

JOANNE BAKER

Introducción

Cuando hablé a mis amigos de este libro, ellos bromearon diciendo que lo primero que hay que saber de la física es que es muy difícil. A pesar de todo, utilizamos la física todos los días. Cuando nos miramos en un espejo o nos ponemos unas gafas utilizamos la física de la óptica. Cuando programamos un despertador nos movemos en el tiempo; cuando observamos un mapa navegamos por el espacio geométrico. Nuestros teléfonos móviles nos conectan por medio de invisibles hilos electromagnéticos con satélites que giran por encima de nuestras cabezas. Pero la física no es sólo tecnología. Sin ella no habría mediodía, ni arco iris, ni diamantes. Incluso la sangre que fluye por nuestras arterias se rige por las leyes de la física, la ciencia del mundo físico.

La física moderna está llena de sorpresas. La física cuántica revolucionó totalmente nuestro mundo al cuestionar el mismísimo concepto de la existencia de un objeto. La cosmología se pregunta qué es el universo. ¿Cómo se originó y por qué estamos aquí? Nuestro universo ¿es especial o de algún modo inevitable? Al escudriñar el interior de los átomos, los físicos descubrieron un mundo fantasmal oculto de partículas elementales. Incluso la mesa de caoba más sólida está compuesta en su mayor parte por espacio vacío, y sus átomos se mantienen unidos por un entramado de fuerzas nucleares. La física surgió de la filosofía y, en cierto modo, ahora regresa a ella al ofrecer nuevas e inesperadas perspectivas del mundo que sobrepasan nuestras experiencias cotidianas.

Sin embargo, la física no se limita a un conjunto de ideas imaginativas. Tiene sus raíces en los hechos y la experimentación. El método científico actualiza continuamente las leyes de la física, igual que el software de un ordenador, eliminando virus y añadiendo nuevos módulos. Si la evidencia lo requiere, se producen importantes cambios de ideas, pero su aceptación tarda un tiempo. Para que la idea de Copérnico de que la Tierra gira alrededor del Sol fuera aceptada de forma generalizada se tardó más de una generación, pero el ritmo se ha acelerado, y la física cuántica y la relatividad se integraron en la física en el plazo de una década. Así pues, incluso las leyes físicas de mayor éxito se cuestionan sin cesar.

Esta obra le ofrece un rápido recorrido por el mundo de la física, desde los

conceptos básicos como la gravedad, la luz y la energía a través de las ideas modernas de la teoría cuántica, el caos y la energía oscura. Espero que, como una buena guía turística, les tiente para desear saber más. La física no es sólo fundamental: es *divertida*.

Sección 1
MATERIA EN MOVIMIENTO

1. Principio de Mach

Un niño montado en un tiovivo es atraído hacia el exterior por las estrellas lejanas. Éste es el principio de Mach: «la masa de allí influye sobre la inercia de aquí». A través de la gravedad, los objetos lejanos afectan al movimiento de las cosas cercanas, y a su forma de girar. Pero ¿por qué sucede esto y cómo se puede afirmar si una cosa se mueve o no?

Si alguna vez ha estado sentado en una estación y ha visto a través de la ventana que el tren de al lado se aleja de usted, sabrá que a veces resulta difícil precisar si es su propio tren el que se marcha o el otro el que llega. ¿Hay alguna forma de determinar con seguridad cuál de los dos se está moviendo?

En el siglo XIX, Ernst Mach, un filósofo y físico austríaco, trató de resolver esta cuestión. Siguió los pasos del gran Isaac Newton que, a diferencia de Mach, creía que el espacio de Newton contenía un conjunto de coordenadas grabadas y él dibujaba todos los movimientos en relación con esa cuadrícula. Sin embargo, Mach disculpaba de él aduciendo que el movimiento sólo tenía significado al medirse con relación a otro objeto, no a la cuadrícula. ¿Qué significa moverse si no es con relación a otra cosa? En este sentido, Mach, influenciado por las ideas previas del competidor de Newton, Gottfried Leibniz, fue un precursor de Albert Einstein cuando escogió creer que sólo tenía sentido el movimiento relativo. Mach argumentaba que si una pelota rueda de la misma manera ya se encuentre en Francia o en Australia, la cuadrícula del espacio es irrelevante. Lo único que posiblemente pueda afectar al movimiento de la pelota es la gravedad. En la Luna, la pelota rodaría de una forma diferente porque la fuerza gravitatoria ejercida sobre la masa de la pelota es más

«El espacio absoluto, por su propia naturaleza y sin relación alguna con nada externo, permanece homogéneo e inmóvil.» Isaac Newton, 1687

débil allí. Como todos los objetos del universo ejercen una fuerza gravitatoria sobre los demás, cada objeto sentirá la presencia de los otros a través de sus atracciones mutuas. Así que el movimiento dependerá, en último término, de la distribución de la materia, o de su masa, no de las propiedades del propio espacio.

Masa

¿Qué es exactamente la masa? Es una medida de la cantidad de materia que contiene un objeto. La masa de un trozo de metal sería igual a la suma de la masa de todos sus átomos. Existe una sutil diferencia entre masa y peso. El peso es una medida de la fuerza de la gravedad que atrae una masa hacia abajo. Un astronauta pesa menos en la Luna que en la Tierra porque la fuerza gravitatoria que ejerce la Luna, que es más pequeña, es menor. Pero la masa del astronauta es la misma: el número de átomos que contiene no ha cambiado. Según Albert Einstein, que mostró que la energía y la masa son intercambiables, la masa puede convertirse en energía pura. Así pues, la masa es, en última instancia, energía.

Inercia

La inercia, que recibe su nombre del vocablo latino para la «indolencia», es muy similar a la masa, pero nos informa sobre la dificultad de mover un objeto aplicando una fuerza. Un objeto dotado de una gran inercia se resiste al movimiento. Incluso en el espacio exterior, se necesita una gran fuerza para mover un objeto de gran masa. Un asteroide rocoso gigante en su trayectoria de colisión con la Tierra necesita un enorme impulso para desviarse, ya sea éste generado por una explosión nuclear o por una fuerza menor aplicada durante más tiempo. Una pequeña nave, con menos inercia que el asteroide, podría ser maniobrada con facilidad mediante pequeños motores a reacción.

> *El astrónomo italiano Galileo Galilei propuso el principio de la inercia en el siglo XVII: si se deja solo a un objeto y no se le aplica ninguna fuerza, su estado de movimiento es inalterable. Si se mueve, lo continuará haciendo a la misma velocidad y en la misma dirección. Si está inmóvil, permanecerá así. Newton depuró esta idea para*

elaborar su primera ley del movimiento.

El cubo de Newton

Newton también codificó la gravedad. Observó que las masas se atraían unas a otras. Una manzana cae al suelo desde el árbol porque es atraída por la masa de la Tierra. Del mismo modo, la Tierra es atraída por la masa de la manzana, pero tendríamos verdaderas dificultades para medir el desplazamiento microscópico de la Tierra entera hacia la manzana.

Newton demostró que la fuerza de la gravedad decae rápidamente con la distancia, así que la fuerza gravitatoria terrestre es mucho menos si flotamos a una gran altura que si nos encontramos en su superficie. No obstante, continuaríamos notando la atracción terrestre aunque en menor medida. Cuanto más nos alejásemos, más débil sería, pero continuaría atrayendo nuestro movimiento. De hecho, todos los objetos del universo ejercen una pequeña fuerza gravitatoria que afecta a nuestro movimiento de un modo sutil.

Newton trató de comprender las relaciones entre objetos y movimiento imaginando un cubo de agua que daba vueltas. Al principio, cuando empezamos a girar el cubo, el agua permanece en reposo aunque el cubo se mueva. Después, el agua también empieza a girar. La superficie se hace cóncava y el líquido intenta rebasar los bordes del cubo, pero se mantiene en el interior gracias a la fuerza de confinamiento del cubo. Newton argumentaba que la rotación del agua sólo podía entenderse en el marco de referencia fijo del espacio absoluto, contra su cuadrícula. Simplemente observándolo se puede saber si el cubo gira, pues se aprecian las fuerzas que participan en él produciendo la superficie cóncava del agua.

ERNST MACH (1838-1916)

Además de por el principio que lleva su nombre, el físico austríaco Ernst Mach es recordado por sus trabajos en el campo de la óptica y la acústica, la fisiología de la percepción sensorial, la filosofía de la ciencia y sobre todo por su investigación sobre la velocidad supersónica. En 1877 publicó un artículo de gran repercusión en el que describe cómo un proyectil que se mueve más rápido que la

velocidad del sonido produce una onda de choque, parecida a una estela. Es esta onda de choque en el aire la que produce la explosión sónica de una nave supersónica. La relación de la velocidad del proyectil, o reactor, con la velocidad del sonido se denomina actualmente número de Mach, de tal modo que Mach 2 es el doble de la velocidad del sonido.

Siglos más tarde, Mach revisó este argumento. ¿Y si el cubo lleno de agua fuera la única cosa en el universo? ¿Cómo se podía saber que estaba girando? ¿No se podía saber también si el agua giraba en relación con el cubo? La única forma de encontrarle un sentido sería colocar otro objeto en el universo del cubo, por ejemplo, la pared de una habitación o una estrella distante. Entonces el cubo estaría girando sin lugar a dudas en relación a ellas. Pero sin la referencia de una habitación inmóvil y de las estrellas fijas, ¿quién podía decir si era el cubo o el agua lo que giraba? Cuando contemplamos el Sol y el arco estelar en el firmamento experimentamos la misma sensación. ¿Son las estrellas o la Tierra lo que se mueve? ¿Cómo podemos saberlo?

Según Mach y Leibniz, para que el movimiento tenga sentido para nosotros hacen falta objetos de referencia externos y, por lo tanto, la inercia como concepto carece de significado en un universo que cuente con un solo objeto. Por tanto, si el universo estuviera desprovisto de estrellas, nunca sabríamos si la Tierra se mueve. Las estrellas nos dicen que giramos en relación a ellas.

Las ideas de movimiento relativo frente a movimiento absoluto expresadas en el principio de Mach han inspirado a muchos físicos desde entonces, por ejemplo a Einstein (que fue quien en realidad acuñó el término «principio de Mach»). Einstein tomó la idea de que todo movimiento es relativo para desarrollar sus teorías de la relatividad especial y general. También resolvió uno de los problemas principales planteados por las ideas de Mach: la rotación y la aceleración debían crear fuerzas adicionales, pero ¿dónde estaban? Einstein demostró que si todo el universo girara en relación con la Tierra, deberíamos experimentar en efecto una pequeña fuerza que haría temblar al planeta de una forma determinada.

La naturaleza del espacio ha desconcertado a los científicos durante milenios. Los

físicos creen que la partícula moderna es un caldero en ebullición de partículas subatómicas que se crean y se destruyen continuamente. La masa, la inercia, las fuerzas y el movimiento quizá no sean, al fin y al cabo, más que manifestaciones de una burbujeante sopa cuántica.

Cronología

aprox. 335 a. C.	Aristóteles afirma que los objetos se mueven debido a la acción de fuerzas.
1640 d. C.	Galileo formula el principio de la inercia.
1687 d. C.	Newton publica su argumento del cubo.
1893 d. C.	Mach publica La ciencia de la mecánica.
1905 d. C.	Einstein publica la teoría especial de la relatividad.

La idea en síntesis: la masa influye en el movimiento

2. Las leyes del movimiento de Newton

Isaac Newton fue uno de los científicos más relevantes, polémicos e influyentes de todos los tiempos. Contribuyó a inventar el cálculo, explicó la gravedad e identificó los colores que componían la luz blanca. Sus tres leyes del movimiento explican por qué una pelota de golf sigue una trayectoria curva, por qué nos vemos empujados hacia el lado externo de un coche que gira y por qué notamos la fuerza a través de un bate de béisbol al golpear la pelota.

Aunque en época de Newton las motos aún estaban por inventarse, sus tres leyes del movimiento explican cómo sube un piloto acrobático por la vertical «pared de la muerte» y cómo corren los ciclistas olímpicos por las pistas inclinadas.

Newton, que vivió en el siglo XVII, se considera uno de los intelectos más destacados de la ciencia. Su carácter altamente inquisitivo le llevó a comprender algunos de los aspectos en apariencia más simples y sin embargo profundos de nuestro mundo, tales como la razón por la que se curva una pelota lanzada al espacio, por qué las cosas caen hacia abajo y no hacia arriba, y cómo se mueven los planetas alrededor del Sol.

Cuando no era más que un estudiante corriente en Cambridge en la década de 1660, Newton se inició en la lectura de las grandes obras de la matemática. A través de ellas se alejó del derecho civil para aproximarse a las leyes de la física. Más tarde, encerrado en su casa durante un período sabático cuando la universidad cerró por un brote de peste, Newton dio los primeros pasos para desarrollar sus tres leyes del movimiento.

Las leyes del movimiento de Newton

***Primera ley**. Los cuerpos se mueven en línea recta a velocidad constante, o permanecen en reposo, a menos que intervenga una fuerza para cambiar su velocidad o dirección.*

***Segunda ley**. Las fuerzas producen aceleraciones que son proporcionales a la masa de un cuerpo (F=ma).*

***Tercera ley**. Toda acción de una fuerza produce una reacción total y opuesta.*

Fuerzas

Tomando prestado el principio de la inercia de Galileo, Newton formuló su primera ley. Ésta afirma que los cuerpos no se mueven ni cambian de velocidad a menos que intervenga alguna fuerza. Los cuerpos inmóviles continuarán en este estado a menos que se les aplique una fuerza; los cuerpos que se mueven a velocidad constante continuarán haciéndolo a esa velocidad a menos que actúe sobre ellos alguna fuerza. Una fuerza (por ejemplo, un empujón) proporciona una aceleración que altera la velocidad del objeto. La aceleración es un cambio en la velocidad durante un cierto tiempo.

Esto resulta difícil de apreciar por medio de nuestra propia experiencia. Si lanzamos un disco de hockey, éste se deslizará sobre el hielo pero finalmente disminuirá de velocidad debido a la fricción con el hielo. La fricción produce una fuerza que decelera el disco. Pero la primera ley de Newton sólo se observa en el caso especial de que no se produzca ninguna fricción. Lo más cerca que podemos encontrarnos de este caso es en el espacio, pero incluso allí actúan fuerzas como la gravedad. Sin embargo, esta primera ley nos ofrece un criterio básico a partir del cual podemos entender las fuerzas y el movimiento.

Aceleración

La segunda ley del movimiento de Newton establece la relación entre la magnitud de la fuerza y la aceleración que produce. La fuerza que se necesita para acelerar un objeto es proporcional a su masa. Los objetos pesados —o mejor dicho, los que tienen una inercia considerable— requieren una fuerza mayor para acelerarse que los objetos ligeros. De modo que para que un coche acelere de 0 (reposo) a 100 kilómetros por hora en un minuto haría falta una fuerza igual a la masa del coche por el incremento de la velocidad por unidad de tiempo.

ISAAC NEWTON (1643-1727)

Isaac Newton fue el primer científico que mereció el honor de ser

nombrado caballero en Gran Bretaña. Pese a ser «holgazán» y «distraído» en la escuela, y un estudiante corriente en la Universidad de Cambridge, Newton floreció repentinamente cuando la peste obligó a cerrar la universidad en el verano de 1665. De vuelta a su casa en Lincolnshire, Newton dedicó toda su atención a las matemáticas, la física y la astronomía, e incluso sentó las bases del cálculo. En esa época, elaboró una primera versión de sus tres leyes del movimiento y dedujo la ley de la inversa del cuadrado para la gravedad. Tras este notable estallido de ideas, Newton fue elegido para ocupar la Cátedra Lucasiana de Matemáticas en 1669 con tan sólo 27 años. Al centrar su atención en la óptica, Newton descubrió mediante un prisma que la luz blanca estaba compuesta por un arco iris de colores, enzarzándose en una famosa disputa con Robert Hooke y Christian Huygens sobre este particular. Newton escribió dos obras importantes, Philosophiae naturalis Principia mathematica, o Principia, y Opticks. Más adelante, Newton pasó a ser políticamente activo. Defendió la libertad académica cuando el rey Jacobo II trató de interferir en los nombramientos universitarios y entró en el Parlamento en 1689. Personaje contradictorio, por una parte deseoso de atraer la atención y por otra retraído y tratando de evitar las críticas, Newton utilizó su privilegiada posición para luchar enérgicamente contra sus enemigos científicos y continuó siendo una figura controvertida hasta su muerte.

La segunda ley de Newton se expresa algebraicamente como «F=ma», la fuerza (F) es igual a la masa (m) por la aceleración (a). O lo que es lo mismo, si damos la vuelta a esta definición, la segunda ley afirma que la aceleración es igual a fuerza por unidad de masa. Para una aceleración constante, fuerza por unidad de masa también es invariable. Así pues, para mover un kilogramo de masa hace falta la misma cantidad de fuerza, ya sea éste parte de un cuerpo grande o pequeño. Esto explica el experimento imaginario de Galileo en el que se pregunta: si tiramos a la vez, ¿qué llegará antes al suelo, una bala de cañón o una pluma? Al visualizarlo,

nos parece que la bala de cañón llegará antes que la pluma flotando. Pero esto se debe simplemente a la resistencia del aire que mueve la pluma. Si no hubiera aire, ambas caerían al mismo ritmo y llegarían al suelo a la vez. Experimentan la misma aceleración, la gravedad, así que caen una junto a otra. Los astronautas del Apolo 15 mostraron en 1971 que en la Luna, donde no existe una atmósfera que haga disminuir de velocidad, la pluma cae al mismo ritmo que el pesado martillo de un geólogo.

Acción es igual a reacción

La tercera ley de Newton dice que cualquier fuerza aplicada a un cuerpo produce una fuerza igual y opuesta sobre ese cuerpo. En otras palabras, para cada acción hay una reacción. La fuerza opuesta se percibe como un retroceso. Si una patinadora empuja a otra, ésta también patinará hacia atrás cuando colisiones con el cuerpo de su compañera. Un tirador percibe el retroceso del rifle contra su hombro al disparar. La fuerza de retroceso es de magnitud igual a la que transmitía originalmente el empujón o la bala. En las películas de crímenes, la víctima de un disparo muchas veces sale despedida hacia atrás a causa de la fuerza del balazo. Esto es un tanto engañoso. Si la fuerza fuera realmente tan grande, el tirador también sería lanzado hacia atrás por el retroceso del revólver. Aunque diéramos un salto hacia arriba para despegarnos del suelo, ejerceríamos una pequeña fuerza sobre la Tierra, pero como la masa terrestre es mucho mayor que la nuestra, apenas se nota.

Con estas tres leyes, más la de la gravedad, Newton explicaba el movimiento de prácticamente todos los objetos, desde las bellotas que caían hasta las balas que se disparaban desde un cañón. Armado con estas tres ecuaciones podría haberse subido con total confianza a una rápida moto y acelerar hasta la pared de la muerte, si tal cosa hubiera existido en su tiempo. ¿Cuánto confía usted en las leyes de Newton? La primera ley dice que la moto y el motorista continuarían viajando en una dirección a una velocidad determinada. Pero para mantener la moto en movimiento en un círculo, de acuerdo con la segunda ley, hace falta una segunda fuerza que cambie su dirección continuamente, en este caso aplicada por la pista a través de las ruedas. La fuerza requerida es igual a la masa de la moto y la del

motorista multiplicada por su aceleración. La tercera ley explica la presión ejercida por la moto sobre la pista, al tiempo que se establece la fuerza de reacción. Ésta es la presión que mantiene unido al conductor acrobático a la pared inclinada, y si la moto va lo bastante rápido puede incluso correr por una pared vertical.

El conocimiento de las leyes de Newton es, incluso en la actualidad, prácticamente todo cuanto necesitamos para describir las fuerzas que intervienen al conducir un coche en una curva a toda velocidad o, Dios no lo quiera, al chocar contra él. En cambio, las leyes de Newton no se sostienen para los objetos que se mueven a una velocidad próxima a la de la luz o con masas muy ligeras. En estos casos extremos, la relatividad de Einstein y la ciencia de la mecánica cuántica tienen plena vigencia.

Cronología

aprox. 350 a. C.	Aristóteles propone en Física que los movimientos se deben a cambios continuos.
1640 d. C.	Galileo formula el principio de la inercia.
1687 d. C.	Newton publica los Principia.
1905 d. C.	Einstein publica la teoría especial de la relatividad.

La idea en síntesis: el movimiento capturado

3. Las leyes de Kepler

Johannes Kepler buscaba patrones en casi todo. Escudriñando las tablas astronómicas que describían el movimiento serpenteante de Marte proyectado en el firmamento, descubrió las tres leyes que gobiernan las órbitas de los planetas. Kepler explicó que los planetas siguen órbitas elípticas y que los más distantes giran alrededor del Sol con mayor lentitud. Además de transformar la astronomía, las leyes de Kepler sentaron las bases para la ley de la gravedad de Newton.

En su trayectoria alrededor del Sol, los planetas que están más cerca de él giran más rápido que los que se encuentran más alejados. Mercurio gira alrededor del Sol exactamente en 80 días terrestres. Si Júpiter se moviera a la misma velocidad tardaría unos 3,5 años terrestres en realizar una órbita completa cuando, en realidad, tarda 12. Mientras todos los planetas pasan uno junto a otro, cuando son observados desde la Tierra parece que algunos retroceden cuando la Tierra los sobrepasa. En la época de Kepler, estos movimientos «retrógrados» constituían un importante misterio. La resolución de este enigma dio a Kepler la idea de desarrollar sus tres leyes del movimiento planetario.

«De pronto se me ocurrió que aquel pequeño guisante, hermoso y azul, era la Tierra. Levanté un pulgar y cerré un ojo, y mi pulgar tapó el planeta Tierra. No me sentí como un gigante. Me sentí muy, muy pequeño.» Neil Armstrong, 1930

Patrones de polígonos El matemático alemán Johannes Kepler buscaba patrones en la naturaleza. Vivió a finales del siglo XVI y principios del XVII, una época en la que la astrología se tomaba muy en una época en la que la astrología se tomaba muy en serio y la astronomía como ciencia física estaba aún en su primera infancia. A la hora de desvelar las leyes de la naturaleza, las ideas religiosas y espirituales eran tan importantes como la observación. Kepler, un místico que creía que la estructura subyacente del universo se construía a partir de formas geométricas perfectas, dedicó su vida a tratar de descubrir los patrones

imaginados de polígonos perfectos ocultos en las obras de la naturaleza.

JOHANNES KEPLER (1571-1630)

A Johannes Kepler le interesó la astronomía desde pequeño: registró en su diario un cometa y un eclipse lunar antes de los diez años. Siendo profesor en Graz, Kepler desarrolló una teoría de la cosmología que fue publicada en el Mysterium Cosmographicum (El sagrado misterio del cosmos). Más tarde, trabajó como ayudante de Tycho Brahe, el astrónomo, en su observatorio a las afueras de Praga, heredando su puesto de matemático imperial en 1601. Allí Kepler preparó horóscopos para el emperador y analizó las tablas astronómicas de Tycho, publicando sus teorías de las órbitas no circulares y la primera y segunda leyes del movimiento planetario, en Astronomia Nova (Nueva Astronomía). En 1620, la madre de Kepler, una curandera, fue acusada de brujería y encarcelada, y sólo obtuvo la libertad gracias a los esfuerzos legales de Kepler. Sin embargo, él logró continuar con su trabajo y la tercera ley del movimiento planetario fue publicada en Harmonices Mundi (Armonía de los mundos).

La obra de Kepler se sucedió un siglo después de que el astrónomo polaco Nicolás Copérnico propusiera que el Sol es el centro del universo y que la Tierra gira alrededor de éste, y no al revés. Antes de eso, remontándonos al gran filósofo griego Ptolomeo, se creía que el Sol y las estrellas giraban alrededor de la Tierra, encerrados en esferas de cristal sólidas. Copérnico no se atrevió a publicar su radical idea en vida, por temor a que chocara con la doctrina de la Iglesia, dejando que su colega lo hiciera justo antes de su muerte. Sin embargo, Copérnico causó una gran conmoción al sugerir que la Tierra no era el centro del universo, lo cual implicaba que los seres humanos no eran los más importantes de éste, tal y como propiciaba un dios antropocéntrico.

Kepler adoptó la idea heliocéntrica de Copérnico, pero aun así continuó pensando que los planetas giraban alrededor del Sol siguiendo órbitas circulares. Imaginó un sistema en el que las órbitas planetarias se hallaban en una serie de esferas anidadas distribuidas de acuerdo con proporciones matemáticas que se derivaban del tamaño de las formas tridimensionales que encajaban en su interior. Así pues, imaginó una serie de polígonos con un número creciente de lados que encajaban dentro de las esferas. La idea de que las leyes de la naturaleza seguían proporciones geométricas básicas tiene sus orígenes en la época de los antiguos griegos.

«Sólo somos una raza avanzada de monos en un planeta menor de una estrella promedio. Pero podemos entender el universo. Eso nos hace muy especiales.» Stephen Hawking, 1989

La palabra planeta procede del griego «vagabundo». Como los demás planetas de nuestro sistema solar se encuentran mucho más próximos a la Tierra que las distantes estrellas, parece que vayan errantes por el firmamento. Noche tras noche siguen un camino por el cielo. Sin embargo, de vez en cuando, su trayectoria se invierte y realizan unos pequeños bucles hacia atrás. Se creía que estos movimientos retrógrados constituían malos augurios. En el modelo ptolemaico del movimiento planetario, este comportamiento era imposible de comprender, y por ello los astrónomos añadían «epiciclos» o bucles adicionales a la órbita de un planeta que imitaba este movimiento. Pero los epiciclos no funcionaban demasiado bien. El universo copernicano centrado en el Sol precisaba de menos epiciclos que el posterior modelo geocéntrico, pero seguía sin poder explicar los detalles exactos.

Leyes de Kepler

Primera ley*. Las órbitas planetarias son elípticas, y el Sol está situado en uno de los focos.*

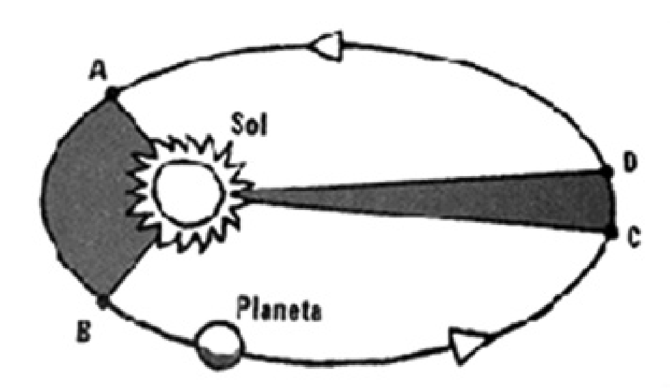
Segunda ley*. Un planeta barre áreas iguales en tiempos iguales mientras gira alrededor del Sol.*

Tercera ley*. Los períodos orbitales aumentan de forma escalada con el tamaño de las elipses, de tal modo que el cuadrado del periodo orbital es proporcional al cubo de la distancia media con el*

Sol.

Al tratar de desarrollar un modelo de las órbitas planetarias que respaldara sus ideas geométricas, Kepler utilizó los datos más exactos de que disponía, unas intrincadas tablas de los movimientos planetarios en el cielo, laboriosamente preparadas por Tycho Brahe. En esas interminables columnas de números Kepler descubrió patrones que sugerían las tres leyes.

Kepler realizó su gran descubrimiento desentrañando los movimientos retrógrados de Marte. Reconoció que los bucles hacia atrás encajarían si las órbitas planetarias alrededor del Sol fueran elípticas y no circulares como se creía. Irónicamente esto significaba que la naturaleza no seguía formas perfectas. Kepler debió de sentirse encantado con su éxito al lograr encajar las órbitas, aunque también conmocionado cuando toda su filosofía de la geometría pura resultó estar equivocada.



Órbitas

En la primera ley, Kepler observó que los planetas se movían siguiendo órbitas elípticas con el Sol en uno de los dos focos de la elipse.

La segunda ley de Kepler describe lo rápidamente que se mueve un planeta alrededor de su órbita. En su trayectoria, el planeta barre un segmento de área igual en un tiempo igual. El segmento se mide utilizando el ángulo formado por el Sol y las dos posiciones del planeta (AB o CD). Como las órbitas son elípticas, cuando el planeta se acerca al Sol tiene que cubrir una larga distancia para barrer la misma área que cuando está más lejos. Así que el planeta se mueve con mayor rapidez cuando está cerca del Sol que cuando está lejos. La segunda ley de Kepler

vincula la velocidad con la distancia del Sol. Este comportamiento se debe en último término a la gravedad que acelera el planeta cuando está cerca de la masa solar.

«Medí los cielos y ahora mido las sombras, el espíritu estaba en el cielo, el cuerpo reposa en la tierra.» Epitafio de Kepler, 1630

La tercera ley de Kepler nos informa de cómo aumentan de forma escalada los períodos orbitales para las elipses de diferentes tamaños en un rango de distancias del Sol. Afirma que el cuadrado de los períodos orbitales es inversamente proporcional al cubo del eje más largo de la órbita elíptica. Cuanto mayor es una órbita elíptica, más lento es el tiempo que tarda en completar una órbita. Un planeta cuya órbita está el doble de lejos del Sol que la Tierra tardará ocho veces más en realizarla. Así pues, los planetas que están más alejados del Sol giran más lentamente que los más cercanos. Marte tarda casi 2 años terrestres en girar alrededor del Sol, Saturno 29 años y Neptuno 165 años.

Con estas tres leyes, Kepler describió todas las órbitas planetarias de nuestro sistema solar. Sus leyes se aplican igualmente a cualquier cuerpo que gire alrededor de otro, desde cometas, asteroides y lunas de nuestro sistema solar hasta planetas que giran alrededor de otras estrellas. Kepler logró unificar con éxito los principios en leyes geométricas, aunque no sabía por qué se sostenían esas leyes. Creía que se originaban en los patrones geométricos subyacentes de la naturaleza. Estas leyes no se unificaron en una teoría universal de la gravedad hasta Newton.

Cronología

aprox. 580 a. C.	Pitágoras expuso la teoría de las órbitas planetarias encerradas en esferas cristalinas perfectas.
aprox. 150 d. C.	Ptolomeo registra el movimiento retrógrado y sugiere que los planetas se mueven en epiciclos.
1543 d. C.	Copérnico sugiere que los planetas giran alrededor del Sol.
1576 d. C.	Tycho Brahe traza un mapa de la posición de los planetas.

1609 d. C.	Kepler descubre que los planetas se mueven siguiendo órbitas elípticas.
1687 d. C.	Newton explica las leyes de Kepler con su ley de la gravedad

La idea en síntesis: ley de los mundos

4. La ley de la gravedad de Newton

Isaac Newton dio un paso de gigante cuando estableció la relación entre el movimiento de las balas de cañón y el de la fruta que caía de los árboles con los movimientos de los planetas. Su ley de la gravedad, continúa siendo una de las ideas más poderosas de la física, que explica en gran medida el comportamiento físico de nuestro mundo. Newton sostenía que todos los cuerpos se atraen entre sí por medio de la fuerza de la gravedad, y la intensidad de esa fuerza decae con el cuadrado de la distancia.

Se cuenta que la idea de la gravedad se le ocurrió a Isaac Newton cuando observó una manzana que caía de un árbol. No sabemos con seguridad si esto es cierto o no, pero Newton hizo un alarde de imaginación para extender su concepción del movimiento terrestre al celeste para desarrollar su ley de la gravedad.

«La gravedad no es un hábito fácil de dejar.» Terry Pratchett, 1992

Newton percibía que los objetos eran atraídos hacia el suelo por alguna fuerza aceleradora. Si las manzanas caen de los árboles, ¿qué ocurriría si el árbol fuera aún más alto? ¿Y si llegara hasta la Luna? ¿Por qué no cae la Luna a la Tierra como una manzana?

Todo cae La respuesta de Newton se fundamentaba en primer lugar en sus leyes del movimiento que vinculaban fuerza, masa y aceleración. Una bala lanzada desde un cañón viaja a una cierta distancia antes de caer al suelo. ¿Qué ocurriría si fuera disparada con mayor rapidez? Pues que viajaría más lejos. Si fuera disparada con la rapidez suficiente como para viajar en línea recta lo bastante lejos para que la Tierra se curvara bajo ella, ¿dónde caería? Newton se percató de que sería atraída hacia la Tierra, pero entonces seguiría una órbita circular. Igual que un satélite es atraído constantemente, pero sin alcanzar jamás el suelo.

Cuando los lanzadores olímpicos de martillo giran sobre sus talones, es la fuerza de la cuerda lo que mantiene al martillo girando. Sin esta fuerza el martillo saldría volando en línea recta, como ocurre cuando lo sueltan. Con la bala de cañón de

Newton pasa lo mismo: sin la fuerza dirigida hacia el centro de la Tierra que mantiene unido el proyectil a ésta, aquél saldría volando hacia el espacio.



Al pensarlo un poco más, Newton razonó que la Luna también está suspendida en el firmamento porque está sujeta por el lazo invisible de la gravedad. Sin la gravedad, ella también saldría despedida por el espacio.

Ley de la inversa del cuadrado

Entonces Newton trató de cuantificar sus predicciones. Demostró que la gravedad sigue la ley de la inversa del cuadrado: la fuerza de la gravedad disminuye con el cuadrado de la distancia de un cuerpo, su gravedad es cuatro veces menor; la gravedad ejercida por el Sol será cuatro veces menor para un planeta en una órbita el doble de lejos de ésta que la Tierra, o un planeta tres veces más lejos experimentará una gravedad nueve veces menor.

«Todos los objetos del universo atraen a todos los demás objetos del universo a lo largo de una línea recta formada por los centros de los objetos, proporcional a la masa de cada objeto e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los objetos.» Isaac Newton, 1687

Esta ley explicaba en una ecuación las órbitas de todos los planetas como se describen en las tres leyes de Johannes Kepler. La ley de Newton predecía que viajaban más rápido cerca del Sol a medida que seguían sus trayectorias elípticas. Un planeta experimenta una fuerza gravitatoria mayor del Sol cuando viaja más cerca de éste, lo cual le hace ir más rápido. A medida que su velocidad aumenta, el planeta se aleja del Sol nuevamente, volviendo a perder gradualmente velocidad. De este modo, Newton integró todos los trabajos anteriores en una teoría fundamental.

Ley universal

Generalizando de una forma audaz, Newton propuso que su teoría de la gravedad se aplicara a todos los objetos del universo. Cualquier cuerpo ejerce una fuerza gravitatoria proporcional a su masa y esa fuerza decae al mismo tiempo que la inversa del cuadrado de su distancia. Por lo tanto, dos cuerpos cualesquiera se atraen entre sí. Pero como la gravedad es una fuerza débil sólo podemos observar realmente esto para los cuerpos de gran masa, como por ejemplo, el Sol, la Tierra y los planetas.

En la superficie de la Tierra, la aceleración debida a la gravedad, g, es de 9,8 metros por segundo al cuadrado.

Es posible observar minúsculas variaciones en la intensidad local de la gravedad en la superficie terrestre. Como las montañas y rocas masivas de diferente densidad pueden elevar o reducir la fuerza de la gravedad cerca de ellas, es posible utilizar un instrumento de medición de la gravedad para trazar un mapa de los terrenos geográficos y conocer la estructura de la corteza terrestre. Los arqueólogos también utilizan los pequeños cambios gravitatorios para determinar los emplazamientos enterrados. Recientemente, los científicos han utilizado satélites espaciales que miden la gravedad para registrar la cantidad (decreciente) de hielo que cubre los polos de la Tierra y también detectar los cambios en la corteza terrestre después de terremotos importantes.

El descubrimiento de Neptuno El planeta Neptuno fue descubierto gracias a la ley de la gravedad de Newton. A principios del siglo XIX,

los astrónomos observaron que Urano no seguía una órbita simple, sino que actuaba como si otro cuerpo la alterara. Se realizaron numerosas predicciones basadas en la ley de Newton y en 1846 Neptuno fue descubierto cerca de la posición esperada. Posee una masa 17 veces mayor que la de la Tierra y es un «gigante gaseoso» con una densa y tupida atmósfera de hidrógeno, helio, amoníaco y metano que recubren un núcleo sólido. El color azulado de las nubes de Neptuno se debe al metano. Sus vientos llegan a alcanzar los 2.500 kilómetros por hora.

Newton vertió todas sus ideas sobre la gravedad en un libro, *Philosophiae naturalis principia mathematica*, conocido como *Principia*. La gravedad universal de Newton explicaba no sólo los movimientos de los planetas y las lunas, sino también de los proyectiles, los péndulos y las manzanas. Explicó las órbitas de los cometas, la formación de las mareas y el bamboleo de los ejes de la Tierra.

Las mareas

Newton describió la formación de las mareas oceánicas en la Tierra en su libro Principia. Las mareas se producen porque la Luna atrae de forma diferente los océanos en el lado más cercano y el más alejado de la Tierra, en comparación con la propia tierra firme. La diferencia de la fuerza gravitatoria en los lados opuestos de la Tierra hace que la superficie del agua sobresalga hacia la Luna y después se aleje de ella, dando origen a las mareas, que suben y bajan cada 12 horas. Aunque el Sol ejerce una mayor fuerza gravitatoria sobre la Tierra que la Luna, esta última posee un mayor efecto mareomotriz por hallarse más próxima a la Tierra. La ley de la inversa del cuadrado significa que el gradiente gravitatorio es mucho mayor para la cercana Luna que para el lejano Sol. Durante una luna nueva o una luna llena, la Tierra, el Sol y la Luna están alineados y se producen mareas especialmente altas, llamadas mareas «vivas». Cuando estos cuerpos no se encuentran alineados,

sino que forman ángulos de 90 grados uno con otro, se producen las mareas bajas o «muertas».

La ley de la gravedad universal de Newton se ha mantenido vigente durante cientos de años y todavía hoy ofrece una descripción básica del movimiento de los cuerpos. La gravedad newtoniana todavía funciona bien para la mayoría de los objetos visibles y para el comportamiento de los planetas, cometas y asteroides del sistema solar que se extienden a grandes distancias del Sol, donde la relatividad es relativamente débil. Aunque la ley de la gravedad de Newton fue lo bastante poderosa para predecir la posición del planeta Neptuno, fue la órbita de Mercurio la que precisó de nuevos conocimientos físicos posteriores a los de Newton. Así pues, la relatividad general es necesaria para explicar situaciones en las que la gravedad es muy fuerte, como la que se produce cerca del Sol, las estrellas y los agujeros negros.

«Se ha dicho que discutir contra la globalización es como discutir contra las leyes de la gravedad.» Kofi Annan, 1938

Cronología:

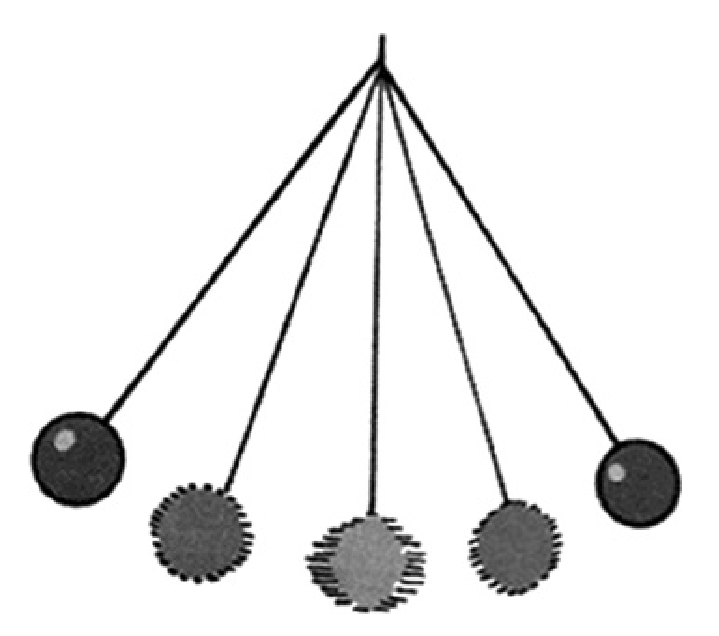
aprox. 350 a. C.	Aristóteles se pregunta por qué caen los objetos.
1609 d. C.	Kepler desvela las leyes de las órbitas planetarias.
1640 d. C.	Galileo enuncia el principio de inercia.
1687 d. C.	Se publican los Principia de Newton.
1905 d. C.	Einstein publica la teoría de la relatividad especial.
1915 d. C.	Einstein publica la teoría general de la relatividad.

La idea en síntesis: la atracción de las masas

5. La conservación de la energía

La energía es una fuerza vital que hace que las cosas se muevan o cambien. Se presenta bajo numerosas apariencias y se manifiesta como un cambio en la altura o la velocidad, ondas electromagnéticas que se desplazan o vibraciones de los átomos que generan calor. La cantidad total de energía siempre se conserva. No se puede crear más, ni se puede destruir.

Todos estamos familiarizados con la energía como impulso básico. Si estamos cansados, es que nos falta; si saltamos de alegría, es que la poseemos en abundancia. Pero ¿qué es la energía? La energía que pone en marcha nuestro cuerpo procede de la combustión de sustancias químicas, del cambio de moléculas de un tipo a otro, siendo liberada energía en este proceso. Pero ¿qué tipo de energía hace que un esquiador descienda a toda velocidad por una pendiente o que una bombilla se encienda? ¿Son realmente la misma cosa?



Al presentarse bajo tantas apariencias, la energía es difícil de definir. Incluso ahora, los físicos no sabe qué es intrínsecamente, aunque son expertos describiendo sus efectos y la forma de manejarla. La energía es una propiedad de la materia y el

espacio, una especie de combustible o impulso encapsulado con potencial para crear, mover o cambiar. Remontándonos a los griegos, los filósofos de la naturaleza tenían una vaga noción de la energía como fuerza o esencia que infundía vida a los objetos y esta idea ha pervivido a lo largo de los siglos.

Intercambio de energía

El primero en darse cuenta de que la energía se podía transformar fue Galileo. Cuando contemplaba un péndulo que oscilaba adelante y atrás, observó que la bola intercambia altura en su movimiento hacia delante y viceversa, y que después la velocidad hace que el péndulo vuelva hacia atrás de nuevo antes de caer y repetir el ciclo. La bola del péndulo carece de velocidad hacia los lados cuando está en uno de los picos o bien en plena oscilación, y alcanza la máxima velocidad cuando pasa por el punto más bajo.

Galileo llegó a la conclusión de que en el péndulo oscilatorio existían dos formas de energía que se intercambiaban. Una es la energía potencial gravitatoria, que puede elevar un cuerpo por encima de la Tierra en oposición a la gravedad. Para elevar una masa hay que incrementar la energía gravitatoria, lo cual se libera cuando la masa cae. Si alguna vez han subido pedaleando en una bicicleta por una colina empinada, sabrán que cuesta una gran cantidad de energía combatir la gravedad. El otro tipo de energía del péndulo es la energía cinética: la energía del movimiento que acompaña a la velocidad. Así pues, el péndulo convierte la energía potencial gravitatoria en energía cinética y viceversa. Un ciclista inteligente utiliza exactamente el mismo mecanismo. Cuando baja por una colina empinada, puede adquirir velocidad y correr con gran rapidez hasta abajo incluso sin pedalear, y puede utilizar esa velocidad para subir una parte del trayecto de la colina siguiente (véase el recuadro).

Fórmulas de la energía

La energía potencial gravitatoria (EP) se representa algebraicamente como PE=mgh, es decir, la masa (m) por la aceleración de la gravedad (g) por la altura (h). Esto equivale al producto de la fuerza (F=ma de la segunda ley de Newton) por la distancia. De modo que

la fuerza es la energía transmitida. La energía cinética (EC) viene dada por $EC=\frac{1}{2}mv^2$*, de forma que la cantidad de energía aumenta en proporción con el cuadrado de la velocidad (v). Esto también se deduce de la fuerza media por la distancia recorrida.*

Las numerosas caras de la energía

La energía se manifiesta de múltiples formas que se presentan temporalmente en diferentes tipos. Un muelle comprimido almacena en su interior energía elástica que se libera a voluntad. La energía térmica incrementa las vibraciones de los átomos y las moléculas en los materiales calientes. Así pues, una sartén metálica al fuego se calienta porque lo átomos de su interior se mueven con mayor rapidez por la entrada de la energía. La energía también puede transmitirse en forma de ondas eléctricas y magnéticas, como las ondas lumínicas o electromagnéticas, y la energía química almacenada puede liberarse mediante reacciones químicas, como sucede en nuestro propio sistema digestivo.

Einstein reveló que la propia masa tiene una energía asociada que puede ser liberada si se destruye la materia. Por tanto, masa y energía son equivalentes. Ésta es su famosa ecuación $E=mc^2$: la energía (E) liberada por la destrucción de una masa (m) es m veces la velocidad de la luz (c) al cuadrado. Esta energía es liberada en una explosión nuclear o en las reacciones de fusión que se producen en nuestro Sol. Como la energía aumenta en proporción con el cuadrado de la velocidad de la luz, que es muy elevada (la luz viaja a 300 millones de metros por segundo en el vacío), la cantidad de energía liberada al destruir aunque sean unos pocos átomos es enorme.

Hablamos de la energía que se genera, pero en realidad se transforma de un tipo en otro. Obtenemos energía química a partir del carbón o del gas natural, y la convertimos en calor que hace girar las turbinas y crea electricidad. En último término, la energía química del carbón y el gas natural proceden del Sol, así que la energía solar es la raíz de todo lo que funciona en la Tierra. Aunque nos preocupamos porque el suministro energético en la Tierra es limitado, la cantidad de energía que se puede obtener del Sol es más que suficiente para cubrir nuestras necesidades, siempre y cuando logremos aprovecharla.

Conservación de la energía

La conservación de la energía como regla física es mucho más que reducir nuestro uso de energía doméstica; quiere decir que la cantidad total de energía no cambia aunque sí puede variar entre diferentes tipos. Este concepto es de aparición relativamente reciente y surgió tras el estudio individual de numerosos tipos de energía. A principios del siglo XIX, Thomas Young introdujo el término energía; anteriormente, esta fuerza vital fue denominada vis viva por Gottfried Leibniz, quien elaboró originalmente las operaciones matemáticas del péndulo.

Muy pronto resultó evidente que la energía cinética no era la única que se conservaba. Las balas de cañón o los reguladores iban perdiendo velocidad y no se movían eternamente. Pero los movimientos rápidos a menudo provocaban que las máquinas se calentaran debido a la fricción, como sucedía cuando se perforaba los tubos metálicos de los cañones, así que los investigadores que realizaban el experimento dedujeron que el calor era uno de los destinos de la energía liberada. Gradualmente, al explicar todos los tipos de energía en las máquinas existentes, los científicos comenzaron a pensar que la energía se transfiere de un tipo a otro y que no se crea ni se destruye.

Momento

La idea de la conservación en física no se limita a la energía. Otros dos conceptos están estrechamente relacionados: la conservación del momento lineal y la conservación del momento angular. El momento lineal se define como el producto de la masa por la velocidad y describe la dificultad de reducir la velocidad de un cuerpo en movimiento. Un objeto pesado que se mueve velozmente tiene un momento elevado y es difícil de desviar o detener. Por lo tanto, un camión que se desplaza a 60 kilómetros por hora tiene un momento mayor que un coche que se mueve a la misma velocidad, y le provocaría un daño mayor si chocara con él. El momento no sólo tiene una magnitud, sino que, debido a la velocidad, también actúa en una dirección específica. Los objetos que colisionan intercambian el momento de tal modo que el valor global se conserva, tanto en cantidad como en dirección. Si alguna vez ha jugado al billar habrá utilizado esta ley. Cuando dos

bolas chocan, transfieren movimiento una a otra para conservar el momento. Así que si golpea una bola en reposo con otra que se mueve, la trayectoria final de ambas será la combinación de la velocidad y la dirección de la bola en movimiento inicial. La velocidad y la dirección de ambas se puede calcular suponiendo que el momento se conserva en todas direcciones.

La conservación del momento angular es similar. El momento angular, para un objeto que gira alrededor de un punto, se define como el producto del momento lineal del objeto por la distancia a la que se encuentra del punto de rotación. La conservación del momento angular se utiliza para conseguir los efectos en las actuaciones de patinaje sobre hielo. Cuando estiran brazos y piernas los patinadores giran lentamente, pero simplemente encogiendo los miembros hacia el cuerpo pueden girar más rápido. La razón de esto es que las dimensiones más pequeñas requieren una velocidad de rotación mayor para compensar. Intente hacerlo en una silla de oficina, también funciona.

La conservación de la energía y el momento son principios que han encontrado un sitio incluso en campos contemporáneos tales como la relatividad general y la mecánica cuántica.

Cronología

aprox. 600 a. C.	Tales de Mileto reconoce que los materiales cambian de forma.
1683 d. C.	Galileo observa el intercambio de energía cinética y potencial en el péndulo.
1676 d. C.	Leibniz formula el intercambio de energía matemáticamente y lo denomina vis viva.
1807 d. C.	Young acuña el término «energía».
1905 d. C.	Einstein muestra que la masa y la energía son equivalentes.

La idea en síntesis: energía indestructible

6. El movimiento armónico simple

Muchas vibraciones adoptan el movimiento armónico simple, que imita la oscilación del péndulo. Relacionado con el movimiento circular, se observa en los átomos que vibran, en los circuitos eléctricos, en las ondas marinas, en ondas de luz e incluso en puentes que se tambalean. Aunque el movimiento armónico simple es predecible y estable, la introducción de pequeñas fuerzas adicionales constantes puede desestabilizarlo y precipitar una catástrofe.

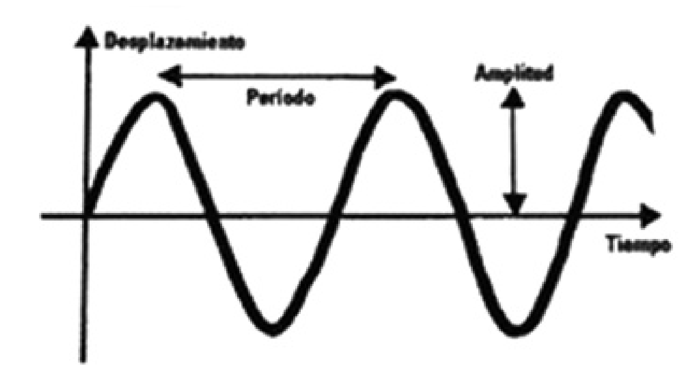
Las vibraciones son muy corrientes. Todos nos hemos sentado alguna vez muy rápidamente y nos hemos balanceado unos segundos en una cama o en un sillón de muelles elásticos, quizá hayamos pulsado la cuerda de alguna guitarra, buscado a tientas el cordoncillo de la luz que cuelga del techo o hayamos escuchado la sonora reverberación de un amplificador electrónico. Todas ellas son formas de vibración.

El movimiento armónico simple describe la forma en que un objeto que se desplaza fuera de su sitio experimenta una fuerza correctora que intenta restituirlo a su lugar. Al ser lanzado desde un punto de partida, se tambalea adelante y agrás hasta que retorna a su posición original. Para provocar el movimiento armónico simple, la fuerza correctora siempre se opone al movimiento del objeto y aumenta proporcionalmente con la distancia a que es desplazado. Por consiguiente, cuanto más lejos se desplaza el objeto, mayor es la fuerza que lo empuja hacia atrás. Cuando se mueve, es propulsado hacia el lado contrario y, como un niño en un columpio, sufre de nuevo un empujón hacia atrás que finalmente lo detiene, y lo devuelve otra vez a su posición original. Así pues, oscila adelante y atrás.

Péndulos

Otra forma de imaginar el movimiento armónico simple es considerarlo como un movimiento circular que se proyecta en una línea, del mismo modo que aparece en el suelo la sombra de un columpio infantil. Igual que la bola del péndulo, la sombra del asiento que se mueve adelante y atrás mientras el columpio oscila se mueve

con lentitud cerca de los extremos y rápido en mitad del ciclo. En ambos casos, la bola o el asiento intercambian energía potencial gravitatoria, o altura, por energía cinética, o velocidad.



La bola de un péndulo que oscila sigue un movimiento armónico simple. Con el tiempo su distancia del punto central de partida traza una onda senoidal o un tono armónico en la frecuencia del péndulo. La bola tiende a colgar hacia abajo, verticalmente en reposo, pero en cuanto es impulsada hacia un lado, la fuerza de la gravedad la empuja de vuelta hacia el centro y adquiere cierta velocidad, lo cual prolonga la oscilación.

La rotación de la Tierra

Los péndulos son sensibles a la rotación de la Tierra. La rotación terrestre hace que el plano de su oscilación se vuelva lento. Si imaginamos un péndulo que cuelga sobre el Polo Norte, oscila en un plano que es fijo en relación con las estrellas. La Tierra gira alrededor de éste, así que si observamos desde un punto de la superficie terrestre su movimiento oscilatorio parece girar 360 grados en un día. Este efecto de rotación no se produce si colgamos el péndulo sobre el ecuador porque el péndulo gira con la Tierra, de modo que su plano oscilatorio no cambia. Desde cualquier otra latitud, el efecto se encontrará en algún punto intermedio. Así pues, el hecho de que la Tierra gira se puede demostrar simplemente observando un péndulo.

El físico francés Léon Foucault ideó una demostración pública bastante famosa que consistía en colgar un enorme péndulo de 70 metros de altura del techo del

Panteón de París. Hoy en día muchos museos de todo el mundo cuentan con su propio péndulo de Foucault gigante. Para que funcione, la primera oscilación tiene que ser iniciada con gran suavidad de forma que el plano oscilatorio sea estable y no se tuerza. La forma tradicional de hacerlo es atar la plomada hacia atrás con una cuerda y después quemar ésta con ayuda de una vela para liberarla muy suavemente. Para que los péndulos gigantes no dejen de moverse durante mucho tiempo, con frecuencia cuentan con una ayuda motorizada para compensar la disminución de la velocidad ocasionada por la resistencia al aire.

Precisión

Aunque se conoce desde el siglo X, el uso del péndulo en los relojes no se generalizó hasta el siglo XVII. Lo que tarda un péndulo en realizar una oscilación depende de la longitud de la cuerda. Cuanto más corta es, más rápido oscila. Para lograr que mantenga su precisión, la longitud del reloj de péndulo del Big Ben se calibra agregando o quitando viejas monedas de penique a la pesada base del péndulo. Las monedas cambian el centro de la base del péndulo. Las monedas cambian el centro de la masa de la plomada, un cambio mucho más sencillo y exacto que mover todo el péndulo entero arriba y abajo.

«Si se añade un penique inglés al péndulo [del Big Ben] gana dos quintos de segundo al día. Todavía tenemos que descubrir qué efecto tendría un euro.» Thwaites & Read, 1992. (Compañía de mantenimiento del Big Ben)

El movimiento armónico simple no se limita a los péndulos, sino que es muy común en la naturaleza. Se puede observar cada vez que se producen vibraciones libres, desde corrientes oscilatorias de circuitos eléctricos hasta el movimiento de partículas en las ondas marinas e incluso el movimiento de los átomos en el universo primigenio.

Buenas vibraciones

Los circuitos electrónicos oscilan cuando las corrientes que circulan por su interior fluyen de aquí para allá, igual que el movimiento pendular. Estos circuitos pueden realizar sonidos electrónicos. Uno

de los primeros instrumentos electrónicos fue el «theremin». Emite unos inquietantes sonidos que suben y bajan de volumen; fue utilizado por los Beach Boys en su canción Good Vibrations. El theremin está compuesto por dos antenas electrónicas y se toca sin rozar siquiera el instrumento, sino simplemente moviendo las manos frente a él. El intérprete controla el tono del sonido con una mano y el volumen con la otra, cada una de ellas actuando como parte de un circuito electrónico. El theremin recibe su nombre de su inventor, el físico ruso Léon Theremin, que desarrollaba sensores de movimiento para el gobierno ruso en 1919. Realizó una demostración ante Lenin, el cual quedó impresionado, y fue introducido en Estados Unidos en la década de 1920. Los theremines empezaron a ser comercializados por Robert Moog, quien más tarde desarrolló el sintetizador electrónico que revolucionó la música pop.

Resonancias

Si tomamos el movimiento armónico simple como punto de partida y agregamos nuevas fuerzas, se pueden describir vibraciones más complicadas. Las vibraciones pueden aumentar, añadiendo energía adicional con un motor, o apagarse, absorbiendo parte de su energía para que disminuyan. Por ejemplo, la cuerda de un violonchelo se puede hacer vibrar durante largo tiempo pulsándola regularmente con el arco. O una cuerda de piano que repica puede extinguirse aplicando un obstáculo de fieltro que absorba su energía. Las fuerzas conductoras, como el arco, pueden tener una cadencia para reforzar las oscilaciones principales o pueden estar desacompasadas. Si no están sincronizadas, el sistema oscilatorio empezará a comportarse de un modo sorprendente y extraño con gran rapidez.

Este drástico cambio de situación en el comportamiento selló el destino de uno de los puentes más largos de Estados Unidos, el Tacoma Narrows en Washington. El puente en suspensión sobre el desfiladero de Tacoma actúa como una gruesa cuerda de guitarra: vibra con facilidad a frecuencias específicas que corresponden a su longitud y dimensiones. Como una cuerda musical, resuena con esta nota fundamental aunque también reverbera con armónicos (múltiples) de esa nota

base. Los ingenieros tratan de diseñar puentes de forma que sus notas fundamentales sean muy diferentes de las frecuencias de los fenómenos naturales, tales como las vibraciones debidas al viento, los coches en movimiento o el agua. Sin embargo, ese fatídico día los ingenieros no estuvieron a la altura.

El puente Tacoma Narrows (conocido localmente como Galloping Gertie) tiene 1.600 metros de longitud y está hecho de pesadas vigas de acero y hormigón. Sin embargo, un día de noviembre de 1940 el viento soplaba con tal fuerza que empezó a provocar oscilaciones y retorcimientos en la frecuencia resonante del puente, haciendo que sufriera fuertes sacudidas y que finalmente se rajara y se desplomara. Afortunadamente no se produjo ninguna víctima, aparte de un perro aterrorizado que mordió a una persona que intentaba rescatarle del coche que iba a aplastarlo. Desde entonces los ingenieros han fijado el puente para evitar que se bambolee, pero incluso hoy los puentes a veces resuenan debido a fuerzas imprevistas.

Las vibraciones que son amplificadas por energía adicional pueden descontrolarse con gran rapidez y se comportan de forma errática. Pueden llegar a ser tan caóticas que dejan de seguir un ritmo regular o predecible. El movimiento armónico simple es el comportamiento estable subyacente, pero la estabilidad se altera con gran facilidad.

Cronología

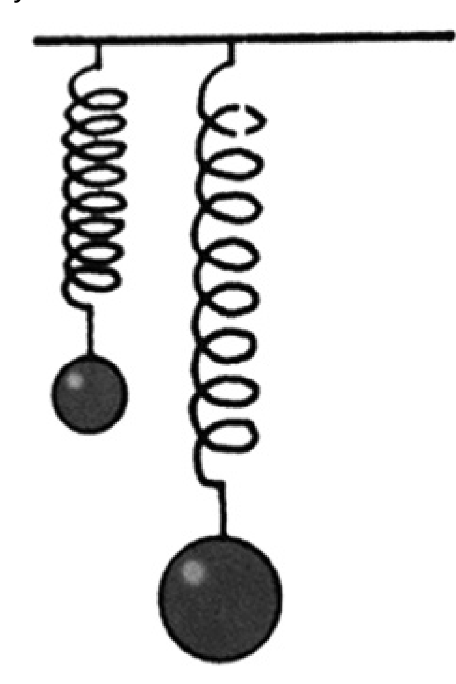
1640 d. C.	Galileo diseña el reloj de péndulo.
1851 d. C.	El péndulo de Foucault demuestra la rotación de la tierra.
1940 d. C.	Se derrumba el puente Tacoma Narrows.
2000 d. C.	El Puente del Milenio londinense (el wobbly, «tembloroso») se cierra tras verse afectado por la resonancia.

La idea en síntesis: la ciencia de la oscilación

7. La ley de Hooke

Derivada originalmente del estiramiento de los muelles de relojes, la ley de Hooke demuestra cómo se deforman los materiales cuando se les aplica una fuerza. Los materiales elásticos se estiran en proporción a la fuerza aplicada. Contribuyente prolífico a la arquitectura además de a la ciencia, resulta extraño que Robert Hooke sólo sea recordado por esta única ley. Pero, al igual que su descubridor, la ley de Hooke comprende numerosas disciplinas, siendo utilizada en ingeniería y en construcción, así como en la ciencia de materiales.

Cuando mira la hora en su reloj Rotary está en deuda con Robert Hooke, un polímata británico del siglo XVII que inventó no sólo los mecanismos del resorte espiral en los relojes de pulsera y de pared, sino que también construyó el Bedlam y bautizó a las células «células» en biología. Hooke era más un investigador que un matemático. Organizó demostraciones científicas en la Royal Society de Londres e inventó numerosos artefactos. Mientras trabajaba con muelles descubrió la ley de Hooke, que dice que la magnitud de la extensión de un muelle es proporcional a la fuerza con la que lo estiramos. Así que si lo estiramos el doble de fuerte, se extenderá dos veces más lejos.



Elasticidad

Los materiales que obedecen la ley de Hooke se denominan «elásticos». Además de estirarse, los materiales elásticos retornan a su posición original cuando deja de aplicarse la fuerza: su estiramiento es reversible. Las bandas de goma y los muelles de alambre rígido se comportan de este modo. En cambio, el chicle no: se alarga si tiramos de él, pero continúa estirado cuando lo soltamos.

Muchos materiales se comportan de forma elástica dentro de una moderada variedad de fuerzas. Pero si los estiramos demasiado, se rompen o fallan. Otros materiales son demasiado rígidos y flexibles para formar parte de la categoría de elásticos, como la cerámica o la arcilla.

ROBERT HOOKE (1635-1703)

Robert Hooke nació en la Isla de Wight, en Inglaterra, hijo de un reverendo. Estudió en Christ Church, Oxford, y trabajó como ayudante del físico y químico Robert Boyle. El 1660 descubrió la ley de Hooke de la elasticidad y muy pronto fue nombrado muy pronto fue nombrado comisario de experimentos para las reuniones de la Royal Society. Al publicar Micrografía cinco años después, Hooke acuñó el término «célula», después de comprar el aspecto de las células de las plantas vistas al microscopio con las celdas de los monjes. En 1666, Hooke ayudó a reconstruir Londres después del gran incendio, trabajando junto a Christopher Wren en el Royal Greenwich Observatory, en el Monumento al Gran Incendio y el Bethlem Royal Hospital (o Bedlam). Murió en Londres en 1703 y fue enterrado en Bishopsgate, aunque en el siglo XIX sus restos fueron trasladados al norte de Londres y su paradero actual es desconocido. En febrero de 2006 fue descubierta una copia perdida hacía largo tiempo de las notas de Hooke sobre las reuniones de la Royal Society, que actualmente se encuentra en la sede de esta sociedad en Londres.

De acuerdo con la ley de Hooke, un material elástico siempre requiere la misma cantidad de fuerza para estirarse una longitud determinada. Esta fuerza característica depende de la rigidez del material (conocida como módulo elástico). Un material rígido requiere una gran fuerza para extenderse. Los materiales con una rigidez muy alta incluyen sustancias duras como el diamante, el carburo de silicio y el tungsteno (wolframio). Materiales más flexibles incluyen las aleaciones de aluminio y la madera.

Se dice que un material que se ha estirado experimenta una deformación. La deformación se define como el porcentaje de aumento en la longitud debido al estiramiento. La fuerza que se aplica (por unidad de área) también se conoce como tensión mecánica. La rigidez se define como la proporción entre tensión y deformación. Muchos materiales, incluyendo el acero, la fibra de carbono e incluso el vidrio, tienen un módulo elástico constante (para deformaciones reducidas) y siguen, por tanto, la ley de Hooke. Cuando se construyen edificios, los arquitectos e ingenieros tienen en cuenta estas propiedades a fin de que cuando se aplican cargas pesadas a la estructura, ésta no se estire ni se combe.

Rebotar

La ley de Hooke no es sólo para ingenieros. Miles de mochileros confían cada año en la ley de Hooke cuando practican puenting, saltando desde una elevada plataforma atados a una cuerda elástica. La ley de Hooke indica al saltador cuánto se estirará la cuerda al experimentar la fuerza de su peso. Es absolutamente decisivo realizar este cálculo correctamente y utilizar la longitud adecuada de cuerda, de tal forma que el cuerpo que cae bruscamente y se dirige hacia el suelo del cañón rebote antes de estrellarse contra él. El puenting como deporte fue iniciado por algunos británicos temerarios que se lanzaron desde el puente colgante de Clifton (Bristol) en 1979, inspirados en un documental televisivo sobre los nativos de Vanuatu que saltaban desde una gran altura, atados por los tobillos con lianas. Los saltadores fueron arrestados, pero continuaron saltando desde otros puentes y la idea se extendió por todo el mundo hasta convertirse en una experiencia comercializada.

Longitud

Los viajeros también confían en la ley de Hooke en otro sentido, para que les ayude a navegar. Aunque medir la latitud, de norte a sur, es fácil teniendo en cuenta la posición del Sol o las estrellas en el firmamento, la longitud, o ubicación este-oeste, alrededor de la Tierra, es mucho más difícil de calcular. En el siglo XVII y principios del XVIII, la vida de los marinos peligraba debido a su incapacidad para señalar su situación. El gobierno británico ofreció un premio en metálico de 20.000 libras

esterlinas, una suma colosal en aquella época, a la persona que lograra vencer los problemas técnicos relativos a la medición de la longitud.

A causa de las diferencias horarias al viajar de este a oeste por el globo, la longitud se puede medir comparando la hora local en el mar, por ejemplo, al mediodía, con la hora de algún otro lugar conocido, como Greenwich en Londres. Greenwich está situado a cero grados de longitud porque la hora fue determinada con relación al observatorio situado en esta ciudad; actualmente se denomina Tiempo Medio de Greenwich. Todo esto está muy bien, pero ¿cómo sabemos qué hora es en Greenwich si nos encontramos en mitad del Atlántico? Igual sucede hoy en día si volamos de Londres a Nueva York y llevamos un reloj de pulsera con la hora de Londres. Pero a principios del siglo XVIII, esto no era fácil. La tecnología relojera de la época no estaba tan avanzada y los relojes más exactos incorporaban péndulos que resultaban del todo inútiles en un barco que no podía evitar el continuo vaivén. John Harrison, un relojero británico, inventó nuevos dispositivos que utilizaban pesos que se balanceaban sobre resortes en lugar de un péndulo que oscilaba. Pero en las pruebas realizadas en el mar ni siquiera éstos resultaron muy convincentes. Un problema que planteaba el uso de resortes en los relojes eran los cambios en su estiramiento con la temperatura. Para los barcos que viajaban desde los trópicos hasta los polos resultaban muy poco prácticos.

«Si he visto más lejos que otros es por haberme subido a hombros de gigantes.» Isaac Newton, 1687...en una carta (posiblemente sarcástica) a Hooke

Harrison dio con una solución nueva. Incorporó al reloj una cinta bimetálica, elaborada con dos metales diferentes adheridos. Los dos metales, como bronce y acero, se expandían en cantidades diferentes cuando se calentaban, haciendo que la cinta se curvara. Incorporada al mecanismo del reloj, la cinta compensaba los cambios de temperatura. El nuevo reloj de Harrison, denominado cronómetro, ganó el premio en metálico y resolvió el problema de la longitud.

Los cuatro relojes experimentales de Harrison se encuentran en la actualidad en el observatorio de Greenwich en Londres. Los tres primeros son de un tamaño bastante considerable, hechos de bronce y cuentan con intrincados mecanismos de equilibrio de los resortes. Están bellamente trabajados y su contemplación es un

placer. El cuarto, el diseño ganador, es mucho más compacto y tiene todo el aspecto de un gran reloj de bolsillo. Estéticamente es menos bello, pero es mucho más preciso. Relojes parecidos se utilizaron durante muchos años en el mar hasta la llegada de los relojes electrónicos de cuarzo.

Hooke

Hooke realizó un gran avance. Protagonista clave de la revolución científica, contribuyó al progreso de numerosas áreas de la ciencia, desde la astronomía a la biología, e incluso la arquitectura. Tuvo famosos enfrentamientos con Isaac Newton. Éste se disgustó enormemente cuando Hooke rehusó aceptar su teoría del color de la luz y jamás reconoció el mérito de Hooke por sugerir la teoría de la inversa del cuadrado de la gravedad.

Resulta sorprendente que a pesar de estos logros Hooke no sea más conocido. No han sobrevivido retratos de él y la propia ley de Hooke es un modesto hito para un hombre tan innovador.

Cronología

1660 d. C.	Hooke descubre su ley de la elasticidad.
1773 d. C.	Harrison recibe una recompensa por lograr medir con éxito la longitud.
1979 d. C.	Se producen los primeros saltos de puenting en Bristol.

La idea en síntesis: fantástico elástico

8. Ley de los gases ideales

La presión, el volumen y la temperatura de un gas están relacionados y la ley de los gases ideales nos explica cómo. Si calentamos un gas, se expandirá; si lo comprimimos, ocupará menos espacio pero tendrá una presión mayor. La ley de los gases ideales es familiar para los viajeros aéreos que se estremecen ante el pensamiento del aire extremadamente frío del exterior de su avión o para los montañeros que esperan una bajada de la temperatura y la presión a medida que ascienden por una montaña.

Si alguna vez ha utilizado una olla a presión entonces ha utilizado la ley de los gases ideales para cocinar su comida. ¿Cómo funcionan las ollas a presión? Son recipientes herméticos que evitan la pérdida de vapor durante la cocción. Como no hay pérdida de vapor, cuando el líquido hierve el vapor adicional se acumula y eleva la presión del interior. La presión puede llegar a ser tan elevada que evita que se acumule más vapor de agua y provoca que la temperatura del caldo del interior sobrepase el punto de ebullición normal del agua, 100 grados Celsius. De esta manera la comida se cocina con mayor rapidez y no pierde sabor.

La ley de los gases ideales se formula del siguiente modo: $PV=nRT$, donde P es la presión, V es el volumen, T es la temperatura y n es el número de moles del gas (donde 1 mol tiene $6x10^{23}$ átomos en él, lo que se denomina número de Avogadro) y R es un número llamado la constante del gas.

La ley de los gases ideales fue formulada por vez primera por el físico francés Émile Clapeyron en el siglo XIX, el cual explicó la relación entre presión, temperatura y volumen. La presión aumenta si el volumen se comprime o si la temperatura se eleva. Imaginemos una caja llena de aire. Si reducimos el volumen de la caja a la mitad, la presión del interior se doblará. Si calentamos la caja original al doble de su temperatura, la presión también se doblará.

Al desarrollar la ley de los gases ideales, Clapeyron combinó dos leyes previas, una de Robert Boyle y otra de Jacques Charles y Joseph Louis Gay-Lussac. Boyle había descubierto ciertos vínculos entre presión y volumen y temperatura. Clapeyron unió las tres magnitudes y denominó «mol» a una cantidad de gas determinada, un término con el que describía un cierto número de átomos o moléculas, a saber 6×10^{23} (es decir, un 6 seguido de 23 ceros), también conocido como número de Avogadro. Aunque esto parezca una enorme cantidad de átomos, es aproximadamente el número de átomos que hay en la mina de un lápiz. El mol se define como el número de átomos de carbono -12 que se encuentran en 12 gramos de carbono. De otro modo, si obtuviéramos el número de Avogadro de las uvas, éstas tomarían el volumen total de la Tierra.

«Hay un simbolismo esperanzador en el hecho de que las banderas no ondeen en el espacio.» Arthur C. Clarke, n. 1917

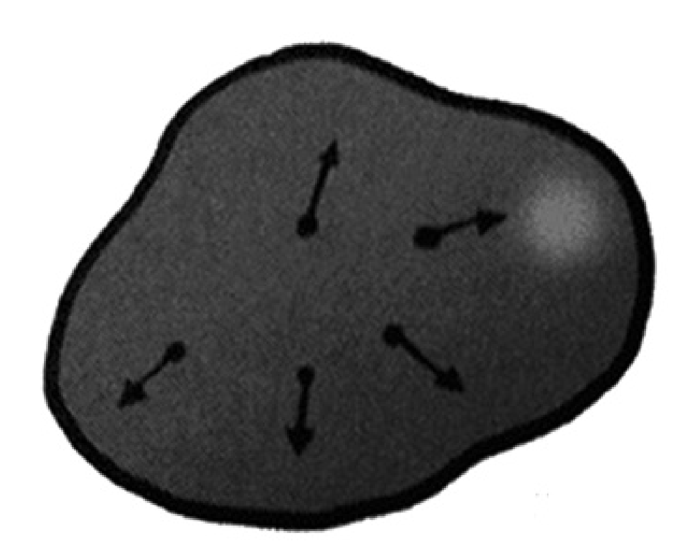
Gas ideal

Entonces, ¿qué es un gas ideal? Por decirlo de un modo sencillo, un gas ideal es el que obedece a la ley de los gases ideales. Y esto es así porque los átomos o moléculas que lo componen son muy pequeños en comparación con la distancia que los separa, así que cuando rebotan alrededor se dispersan unos a otros claramente. Además, no hay fuerzas adicionales entre partículas que puedan provocar uniones, como sucede con las cargas eléctricas.

Los gases «nobles» como el neón, el argón y el xenón se comportan como gases ideales formados por átomos individuales (más que moléculas). Las moléculas ligeras simétricas como las del hidrógeno, el nitrógeno o el oxígeno se comportan prácticamente como gases ideales, mientras que las moléculas de gas más pesadas, como las del butano, es menos probable que lo hagan.

Los gases tienen una densidad muy baja y los átomos o moléculas que hay en ellos no se mantienen unidos, sino que pueden moverse libremente. En los gases ideales, los átomos se comportan como miles de bolas de goma sueltas por una pista de squash, rebotando unas contra otras y contra las paredes del recinto. Los gases carecen de límites, pero se pueden mantener en el interior de un recipiente

que defina un determinado volumen. Una reducción en el tamaño de ese recipiente comprime las moléculas y, de acuerdo con la ley de los gases, aumenta tanto la presión como la temperatura.



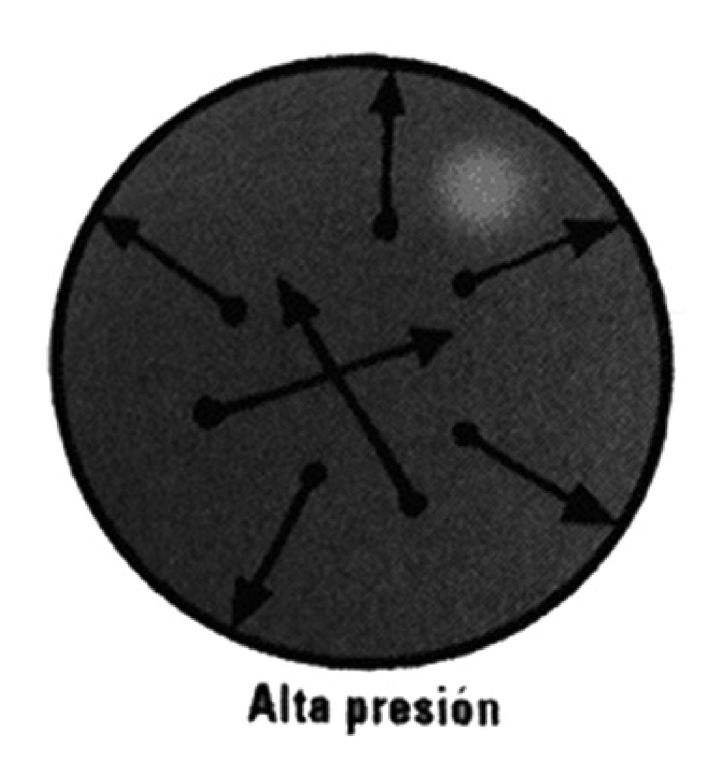
Baja presión

La presión de un gas ideal se produce por la fuerza de los átomos y las moléculas que chocan contra las paredes del recipiente y también entre sí, cuando se mueven de un lado a otro. De acuerdo con la tercera ley de Newton, las partículas que rebotan ejercen una fuerza opuesta sobre las paredes del recipiente. Las colisiones con las paredes son elásticas, así que las partículas rebotan sin perder energía, ni quedarse adheridas, sino que transfieren el momento a la caja, el cual es percibido como una presión. El momento haría que la caja se moviera hacia afuera, pero su fuerza resiste cualquier movimiento, y las fuerzas se perciben en numerosas direcciones, compensándose por término medio.

Elevar la temperatura incrementa la velocidad de las partículas, así que la fuerza ejercida sobre las paredes es aún mayor. La energía calorífica se transfiere a las moléculas, provocando un aumento en su energía cinética y haciendo que se muevan más rápido. Cuando chocan contra las paredes transfieren un momento aún mayor, incrementando la presión.

Reducir el volumen incrementa la densidad del gas, por lo que se producirán más

colisiones contra las paredes y la presión volverá a elevarse. La temperatura también se eleva porque, como la energía se conserva, las moléculas aumentan de velocidad cuando se encuentran en un espacio limitado.



Algunos gases reales no siguen exactamente esta ley. Los gases con moléculas más grandes o más complejas pueden experimentar fuerzas adicionales entre ellas, lo que significa que tienden a agruparse con mayor frecuencia que un gas ideal. Estas fuerzas de adhesión se originan debido a las cargas eléctricas de los átomos que componen las moléculas y es más probable que existan si el gas está muy comprimido o muy frío de forma que las moléculas se mueven con lentitud. Las moléculas verdaderamente adhesivas como las proteínas o las grasas nunca se convierten en gases.

Presión y altitud

Cuando escalamos una montaña en la Tierra la presión atmosférica desciende, comparado con la presión que existe a nivel del mar, sólo porque tenemos menos atmósfera encima. Seguramente habrá observado que esto coincide con una bajada brusca de la temperatura. Cuando volamos en avión, la temperatura exterior

desciende hasta alcanzar temperaturas bajo cero. Esto es una demostración de la ley de los gases ideales.

A gran altitud, como la presión atmosférica es baja, el agua hierve a una temperatura mucho más baja que a nivel del mar. Como las comidas no se cuecen bien, los montañeros a veces utilizan ollas a presión. Incluso Charles Darwin se lamentaba de no tener una a mano durante sus viajes por los Andes en 1835, ya que conocía la «olla a vapor» que había sido inventada por el físico francés Denis Papin a finales del siglo XVII.

> *Como escribió Darwin en su Viaje en el Beagle:*
> *En el lugar donde dormimos, el agua hervía necesariamente a una menor temperatura debido a la disminución de presión atmosférica, a una temperatura más baja que en un país menos elevado; era el caso contrario al de la olla de Papin. Así, las patatas, después de estar varias horas cociéndose en agua estaban casi tan duras como al principio. Dejamos incluso el cazo al fuego toda la noche y al hervirlas de nuevo a la mañana siguiente seguían sin cocerse. Recordé esto mientras oía a mis compañeros discutir acerca de la causa de aquello; habían llegado a la sencilla conclusión de que «aquella maldita olla [que era nueva] no servía para cocer patatas».*

Vacío

Si pudiéramos volar sobre las montañas hasta la cima de la atmósfera, quizá hasta el espacio exterior, la presión descendería casi hasta cero. Un vacío perfecto no contendría ningún átomo, pero esto es imposible en el universo. Incluso en el espacio exterior, hay átomos diseminados, aunque sean tan sólo unos pocos átomos de hidrógeno por centímetro cúbico. Los filósofos griegos Platón y Aristóteles no creían que pudiera existir el vacío puro, como tampoco podía existir la «nada».

Actualmente las ideas de la mecánica cuántica también han dejado a un lado la idea del vacío como espacio vacío, sugiriendo que está repleto de partículas subatómicas virtuales que aparecen y desaparecen repentinamente. La cosmología ha llegado a

sugerir incluso que el espacio puede tener una presión negativa que se manifiesta como energía oscura, acelerando la expansión del universo. Parece que la naturaleza aborrece verdaderamente el vacío.

Cronología

aprox. 350 a. C.	Aristóteles afirma que «la naturaleza aborrece el vacío».
1650 d. C.	Otto von Guericke construye la primera bomba de vacío.
1662 d. C.	Se formula la ley de Boyle (PV=constante).
1672 d. C.	Papin inventa su olla.
1802 d. C.	Se formula la ley de Charles y Gay Lussac (V/T=contante).
1834 d. C.	Clapeyron deduce la ley de los gases ideales.

La idea en síntesis: la física de las ollas a presión

9. Segunda ley de la termodinámica

La segunda ley de la termodinámica es un pilar de la física moderna. Afirma que el calor pasa de los cuerpos calientes a los fríos y no al contrario. Como el calor mide el desorden o entropía, otra forma de expresar este concepto es que para un sistema aislado la entropía siempre aumenta. La segunda ley está vinculada a la progresión de tiempo y al destino final del universo.

Cuando añade café caliente a su vaso de hielo, el hielo se calienta y se derrite, y el café se enfría. ¿Se ha preguntado alguna vez por qué no se hacen más extremas las temperaturas? El café podría extraer calor del hielo, calentándose más y haciendo que el hielo se enfriara aún más. Nuestra experiencia nos dice que esto no es lo que sucede, pero ¿por qué no?

La tendencia de los cuerpos calientes y fríos a intercambiar calor y a alcanzar una temperatura uniforme queda expresada por la segunda ley de la termodinámica. A grandes rasgos, afirma que el calor no puede fluir de un objeto frío a otro caliente.

Entonces, ¿cómo funcionan las neveras? ¿Por qué podemos congelar un vaso de zumo de naranja si no podemos transferir su calidez a otra cosa? La segunda ley nos permite hacer esto sólo en circunstancias especiales. Como consecuencia de enfriar las cosas, las neveras generan una gran cantidad de calor, cosa que se aprecia al poner la mano en la parte trasera. Como liberan calor, de hecho no quebrantan la segunda ley de la termodinámica si atendemos a la energía total de la nevera y su entorno.

Entropía

El calor es realmente una medida de desorden y, en física, el desorden con frecuencia se cuantifica como «entropía», que mide los modos en que se ordenan un cierto número de elementos. Un paquete de espaguetis crudos, un fajo de palitos alineados, tiene una baja entropía porque los espaguetis están muy ordenados. Cuando se tiran a la olla de agua hirviendo y se mezclan, están más desordenados y por tanto su entropía es mayor. De forma similar, filas bien

ordenadas de soldados de juguete tienen entropía baja, pero su distribución tiene una entropía mayor si están tirados por el suelo.

¿Qué tiene esto que ver con las neveras? Otra manera de formular la segunda ley de la termodinámica es que, para un sistema limitado, la entropía aumenta, nunca disminuye. La temperatura tiene una relación directa con la entropía y los cuerpos fríos tienen una entropía baja. Sus átomos están menos desordenados que los de los cuerpos calientes, que se mueven mucho más. Por lo tanto, cualquier cambio en la entropía de un sistema, considerando todas sus partes, tiene que producir un efecto neto que constituya un aumento.

«Del mismo modo que el aumento constante de la entropía es la ley básica del universo, la ley básica de la vida es estar cada vez mejor estructurado y luchar contra la entropía.» Václav Havel, 1977

En el caso de la nevera, el enfriamiento del zumo de naranja hace disminuir su entropía, pero esto queda compensado por el aire caliente que produce el electrodoméstico. De hecho el aumento en la entropía del aire caliente excede cualquier descenso debido a la congelación. Si tenemos en cuenta el sistema entero, la nevera y su entorno, la segunda ley de la termodinámica continúa siendo cierta. Otra forma de expresar la segunda ley de la termodinámica es que la entropía siempre aumenta.

La segunda ley es cierta para un sistema aislado, un sistema cerrado en el que no existen flujos de entrada ni de salida de energía. La energía se conserva en su interior. El propio universo es un sistema aislado, en el sentido de que nada existe fuera de él, por definición. Así pues, para el universo como un todo la energía se conserva y la entropía siempre aumenta. Las regiones pequeñas podrían experimentar un ligero descenso en la entropía, por ejemplo mediante el enfriamiento, pero esto tiene que tener una compensación, como en el caso de la nevera, por medio del calentamiento de otras zonas y la creación de más entropía de tal forma que la suma global aumente.

¿El universo (pasado) de moda?

Recientemente los astrónomos trataron de calcular el color medio

del universo sumando la luz de todas las estrellas, y descubrieron que no es amarillo brillante, ni rosa, ni azul pálido, sino un beige bastante deprimente. En miles de millones de años, cuando la entropía finalmente triunfe sobre la gravedad, el universo se convertirá en un mar uniforme de color beige.

¿Qué aspecto tiene un aumento en la entropía? Si tira sirope de chocolate en un vaso de leche, empieza teniendo una entropía baja; la leche y el sirope aparecen como dos remolinos diferentes de blanco y marrón. Si aumentamos el desorden removiendo el contenido del vaso, las moléculas se mezclan. El punto final de máximo desorden se da cuando todo el sirope está completamente mezclado con la leche y se vuelve de un color pálido de caramelo.

Si pensamos de nuevo en el universo como un todo, la segunda ley implica también que los átomos gradualmente se desordenan cada vez más con el tiempo. Cualquier fragmento de materia se dispersará lentamente hasta que el universo esté inundado con sus átomos. Por consiguiente, el destino final del universo, que se inicia como un tapete multicolor de estrellas y galaxias, es un mar gris de átomos mezclados. Cuando el universo se haya expandido tanto que las galaxias se rompan y su materia se diluya, sólo quedará una sopa de partículas variadas. Suponiendo que el universo continúe su expansión, este estado final se denomina «muerte térmica».

Móvil perpetuo

Como el calor es una forma de energía, se puede aprovechar como trabajo. Un motor de vapor convierte el calor en el movimiento mecánico de un pistón o una turbina, lo que genera electricidad. Gran parte de la ciencia de la termodinámica se desarrolló en el siglo XIX a partir de la ingeniería práctica de los motores de vapor.

Otra consecuencia de la segunda ley es que los motores de vapor y otros motores que funcionan con energía térmica no son perfectos. En cualquier proceso en que se transforme el calor en otra forma de energía se pierde una pequeña parte de energía, de forma que la entropía del sistema en conjunto aumenta.

La idea de una máquina de movimiento continuo ha seducido a los científicos desde

el Medievo. La segunda ley de la termodinámica acalló sus esperanzas, pero se sabe que muchos de ellos propusieron esbozos de posibles máquinas. Robert Boyle diseñó un frasco de autollenado y el matemático indio Bhaskara propuso una rueda provista de pesas en los radios que impulsaba su propio giro soltando las pesas al rodar. De hecho, un examen más atento revela que ambas máquinas pierden energía. Ideas como éstas llegaron a ser tan corrientes que incluso en el siglo XVIII las máquinas del movimiento continuo se granjearon muy mala fama. Tanto la Real Academia Francesa de las Ciencias como la Oficina Americana de Patentes vetaron la consideración de las máquinas de movimiento continuo. En la actualidad, constituyen el feudo de inventores excéntricos de segunda.

Otra perspectiva de las leyes de la termodinámica

Primera ley*: No puede ganar (véase Tema 5)*

Segunda ley*: Sólo puede perder (véase este capítulo)*

Tercera ley*: No puede abandonar el juego (véase Tema 10)*

El demonio de Maxwell

Uno de los esfuerzos más controvertidos para contravenir la segunda ley de la termodinámica fue concebido como un experimento mental por el físico escocés James Clerk Maxwell, en la década de 1860. Imaginemos dos recipientes llenos de gas uno junto a otro, a la misma temperatura. Un pequeño agujero separa ambos recipientes, de forma que las partículas de gas pueden pasar de uno a otro. Si un lado estuviera más caliente que el otro, las partículas pasarían y gradualmente harían que la temperatura fuera más uniforme. Maxwell imaginó que había un pequeño demonio, un diablillo microscópico, que cogía únicamente las moléculas rápidas de uno de los recipientes y los pasaba al otro. De esta forma, la velocidad media de las moléculas del recipiente aumentaría, a expensas del otro. En tal caso, postuló Maxwell, el calor se trasladaría del recipiente más frío al más caliente. ¿No quebrantaría este proceso la segunda ley de la termodinámica? ¿Se podía transferir el calor a un cuerpo más caliente seleccionando las moléculas adecuadas?

Una explicación de por qué el demonio de Maxwell no funcionó ha desconcertado a los físicos desde entonces. Muchos han argumentado que el proceso de medir la

velocidad de las partículas y de abrir y cerrar una puerta requiere trabajo y, por tanto, energía, así que esto significaría que la entropía total del sistema no disminuiría. Lo más cerca que cualquiera ha estado de una «máquina diabólica» es el trabajo a nanoescala del físico de Edimburgo David Leigh. Su creación ha separado efectivamente las partículas de movimiento rápido de las de movimiento lento, pero para hacerlo necesita una fuente de energía externa. Como no hay ningún mecanismo que pueda mover partículas sin utilizar energía adicional, ni siquiera los físicos actuales han hallado el modo de contravenir la segunda ley de la termodinámica.

Cronología

1150 d. C.	Bhaskara propone la rueda del movimiento continuo.
1824 d. C.	Sadi Carnot sienta las bases de la termodinámica.
1850 d. C.	Rudolf Clausius define la entropía y la segunda ley.
1860 d. C.	Maxwell postula la existencia de su demonio.
2007 d. C.	Leigh afirma haber construido una máquina diabólica.

La idea en síntesis: ley del desorden

10. Cero absoluto

El cero absoluto es el punto imaginario en el cual una sustancia está tan fría que el movimiento de sus átomos cesa. El cero absoluto propiamente dicho no ha llegado a alcanzarse jamás, ni en la naturaleza, ni en el laboratorio. Pero los científicos se han acercado mucho. Puede que llegar al cero absoluto sea imposible, e incluso aunque pudiéramos alcanzarlo quizá no lo sabríamos puesto que ningún termómetro es capaz de medirlo.

Cuando medimos la temperatura de algo estamos registrando la energía media de las partículas que lo componen. La temperatura nos indica lo rápido que vibran o se mueven sus partículas. En un gas o un líquido, las moléculas son libres de viajar en cualquier dirección y a menudo chocan unas contra otras. Así que la temperatura está relacionada con la velocidad media de las partículas. En un sólido, los átomos están unidos formando una estructura de rejilla, como un Meccano que se mantiene unido por medio de enlaces electrónicos. Cuando se calienta, los átomos están llenos de energía y se mueven nerviosamente, como en una gelatina temblequeante, mientras continúan en sus posiciones.

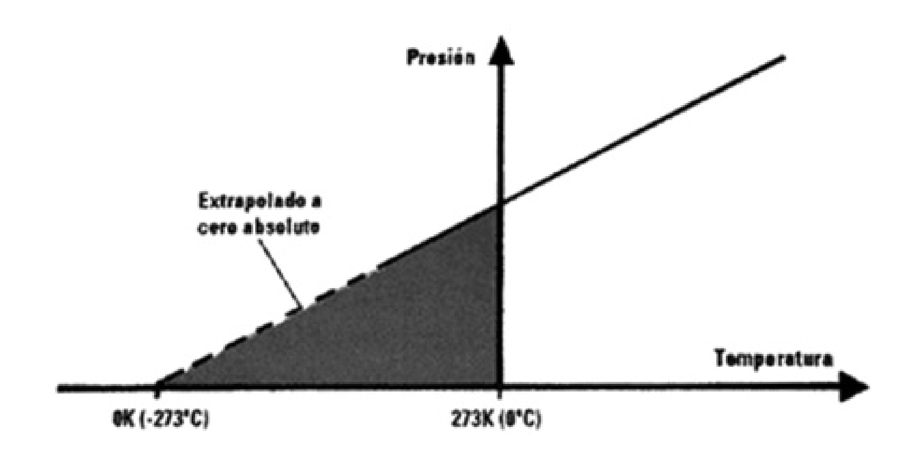
Si se enfría el material, los átomos se mueven menos. En un gas, su velocidad disminuye; en un sólido las vibraciones se reducen. Si la temperatura sigue bajando, los átomos cada vez se mueven menos. Si se enfriara lo bastante, una sustancia podría llegar a estar tan fría que el movimiento de sus átomos cesara por completo. Este hipotético punto de reposo se denomina cero absoluto.

Escala Kelvin

La idea de un cero absoluto fue reconocida en el siglo XVIII al extrapolar un gráfico de temperatura y energía a cero. La energía aumenta de forma continua con la temperatura, y la línea que conecta ambas magnitudes puede proyectarse hacia atrás para calcular la temperatura a la cual la energía alcanza el cero: -273,15 grados Celsius o -459,67 grados Fahrenheit.

En el siglo XIX, Lord Kelvin propuso una nueva escala de temperatura que

comenzaba en el cero absoluto. La escala Kelvin tomaba efectivamente la escala de la temperatura Celsius y la desplazaba. Así pues, el agua en lugar de congelarse a 0 grados Celsius lo hace a 273 kelvin y hierve a 373 kelvin (equivalente a 100 grados Celsius). Los valores superiores de esta escala son fijos, como lo es el punto triple del agua, la temperatura a la cual (a una presión determinada) el agua, el vapor y el hielo pueden coexistir, lo que sucede a 273,16 kelvin o a 0.01 Celsius a baja presión (menos del 1% de la presión atmosférica). Hoy en día, la mayoría de los científicos utilizan el kelvin para medir la temperatura.



El Gran Frío

¿Cómo sería el cero absoluto? Sabemos cómo es cuando la temperatura exterior alcanza temperaturas bajo cero o cuando empieza a nevar. El aliento se congela y los dedos se entumecen. Eso ya es bastante frío. En ciertas zonas de Norteamérica y Siberia se pueden alcanzar temperaturas de 10 a 20 bajo cero en invierno y en el Polo Sur se llega incluso a -70 grados Celsius. La temperatura natural más fría que se puede experimentar en la Tierra es de -89 grados Celsius o 184 kelvin, alcanzada en Vostok, en el corazón de la Antártida en 1983.

La temperatura también desciende si escalamos una montaña o volamos en un avión a gran altura por la atmósfera. Si salimos al espacio exterior, hace aún más frío. Incluso en las profundidades más lejanas y recónditas del espacio los átomos más fríos tienen temperaturas unos pocos grados por encima del cero absoluto. El entorno más frío que se ha encontrado hasta ahora en el universo está situado en el interior de la nebulosa Boomerang, una nube gaseosa oscura que se encuentra

justo un grado por encima del cero absoluto.

Fuera de esta nebulosa y en todo el espacio vacío, la temperatura ambiente es relativamente suave, de 2,7 kelvin. Este tibio baño se debe a la radiación de fondo de microondas cósmicas, calor remanente del propio big bang, que perdura en el espacio. Para enfriarse aún más si cabe, las regiones tendrían que resguardarse de esta calidez de fondo y los átomos deberían haber perdido su calor residual. Por lo tanto, es prácticamente inconcebible que en algún punto del espacio se encuentre el cero absoluto.

«Como me gusta conservar mis polos a cero absoluto, utilizo el kelvin más que la mayoría de los americanos. Encuentro que los postres no son deliciosos a menos que no presenten ningún movimiento molecular de ésos.»
Chuck Klosterman, 2004

El frío interior

Incluso las temperaturas más frías se han alcanzado de forma temporal en el laboratorio, donde los físicos han tratado de aproximarse al cero absoluto durante breves períodos de tiempo. Se han acercado mucho, mucho más que en el espacio exterior ambiente.

En los laboratorios se utilizan muchos refrigerantes en forma de gas líquido, pero están por encima del cero absoluto. Es posible refrigerar el nitrógeno hasta que se vuelve líquido a 77 kelvin (-196 grados Celsius). El nitrógeno líquido es fácil de transportar en cilindros y se utiliza en los hospitales para conservar las muestras biológicas, incluyendo embriones congelados y esperma en las clínicas de fertilidad, además de utilizarse en electrónica avanzada. Cuando se enfría mediante la inmersión en nitrógeno líquido, la corola de un clavel se vuelve tan quebradiza que se rompe como la porcelana si se cae al suelo.

El helio líquido es aún más frío, sólo a 4 kelvin, pero todavía muy por encima del cero absoluto. Al mezclar dos tipos de helio, el helio-3 y el helio-4, es posible enfriar la mezcla unos pocos miles de kelvin.

Para alcanzar temperaturas aún más bajas, los físicos necesitan tecnología aún más inteligente. En 1994, en el American National Institute for Standards and Technology (NIST) en Boulder, Colorado, los científicos lograron enfriar átomos de cesio por medio de láseres a 700.000 millonésimas de kelvin del cero absoluto. Nueve años después, los científicos del Instituto de Tecnología de Massachusetts fueron más allá, llegando a alcanzar las 500 millonésimas de kelvin.

«Durante la primera mitad de su carrera, Thomson parecía incapaz de equivocarse mientras que durante la segunda mitad de su trayectoria parecía incapaz de acertar.» C. Watson, 1969 (biógrafo de Lord Kelvin)

Realmente, el cero absoluto es una idea abstracta. Jamás se ha alcanzado en un laboratorio, ni se ha medido en la naturaleza. Mientras tratan de aproximarse a él, los científicos tienen que aceptar que quizá no sea posible alcanzar con certeza el cero absoluto.

LORD KELVIN (1824-1907)

El físico británico Lord Kelvin, nacido William Thomson, se ocupó de numerosos problemas de electricidad y calor, aunque su mayor fama procede de ayudar a construir el primer cable submarino transatlántico para la transmisión del telégrafo. Thomson publicó más de 600 artículos y fue elegido presidente de la prestigiosa Royal Society de Londres. Era un físico conservador y rehusó aceptar la existencia de los átomos, se opuso a las teorías evolucionistas de Darwin y a otras teorías relacionadas sobre la edad de la Tierra y del Sol, lo que le situó en el bando de los perdedores en numerosas discusiones. Thomson fue nombrado barón Kelvin de Largs, por el río Kelvin que pasa por la Universidad de Glasgow y por su ciudad natal de Largs en la costa escocesa. En 1900, Lord dio una famosa conferencia ante la Royal Institution of Great Britain, donde lamentó el hecho de que «la belleza y la claridad de la teoría» estuvieran ensombrecidas por «dos nubes», a saber la por entonces errónea teoría de la radiación de los cuerpos negros y el intento fallido de observar el «éter» o medio gaseoso por el cual se suponía que

viajaba la luz. Los dos problemas que señaló serían resueltos más tarde por la relatividad y la teoría cuántica, pero Thomson luchó por resolverlos con ayuda de la física newtoniana de su tiempo.

¿Y esto por qué? En primer lugar, ningún termómetro que no estuviera ya en el cero absoluto podría transmitir calor y arruinar así el éxito de su logro. En segundo lugar, es difícil medir la temperatura a energías tan bajas, donde intervienen otros efectos como la superconductividad y la mecánica cuántica, afectando al movimiento y a los estados de los átomos. Por lo tanto, nunca podremos tener la seguridad de haber llegado hasta él. El cero absoluto puede ser un buen ejemplo del «lugar que no existe».

Cronología

1702 d. C.	Guillaume Amontons propone la idea del cero absoluto.
1777 d. C.	Lambert propone una escala de temperatura absoluta.
1802 d. C.	Gay-Lussac identifica el cero absoluto en -273 grados Celsius.
1848 d. C.	Se define la escala de la temperatura kelvin.
1900 d. C.	Kelvin ofrece su conferencia de las «dos nubes».
1930 d. C.	Mediciones experimentales señalan el cero absoluto con mayor precisión.
1954 d. C.	Se define oficialmente el cero absoluto como -273,15 grados Celsius.

La idea en síntesis: el Gran Frío

11. El movimiento browniano

El movimiento browniano describe los movimientos aleatorios de las partículas microscópicas que se encuentran sometidas al bombardeo incesante de las moléculas invisibles de agua o gases. El botánico Robert Brown fue el primero en observarlo mientras estudiaba al microscopio unas partículas de polen que flotaban en el agua de su portaobjetos, pero fue Albert Einstein quien lo describió de forma matemática. El movimiento browniano explica cómo se dispersa la polución a través del aire o del agua y describe numerosos procesos aleatorios, desde las inundaciones hasta el mercado de valores. Sus impredecibles pasos están relacionados con los fractales.

El botánico del siglo XIX Robert Brown se encontraba examinando unos granos de polen al microscopio cuando se percató de que no estaban inmóviles, sino que se retorcían incesantemente. Por un momento se preguntó si estarían vivos. Evidentemente no, sino que estaban sufriendo las colisiones de las moléculas del agua que Brown había utilizado para cubrir el portaobjetos de vidrio. Las partículas de polen se movían aleatoriamente, unas veces muy poco y otras mucho, y gradualmente se revolvían por el portaobjetos siguiendo trayectorias impredecibles. La comunidad científica quedó asombrada ante el descubrimiento de Brown, que recibió por ello el nombre de movimiento browniano.

Trayectoria aleatoria

El movimiento browniano tiene lugar porque las minúsculas partículas de polen experimentan una pequeña sacudida cada vez que una molécula de agua choca contra ellas. Las invisibles moléculas de agua se mueven sin cesar y chocan unas con otras sin descanso, de modo que topan contra el polen regularmente, dándole empujones.

Aunque el tamaño de los granos de polen es cientos de veces más grande que una molécula de agua, como el polen recibe golpes a cada momento por parte de numerosas moléculas, cada una de las cuales se desplaza en una dirección

aleatoria, normalmente existe una fuerza de desequilibrio que hace que se mueva un poco. Esto ocurre una y otra vez, de modo que el grano de polen sacudido sigue una trayectoria irregular, un poco como el recorrido de un borracho dando traspiés. El camino del polen no se puede predecir con antelación porque las moléculas de agua colisionan de forma aleatoria y por lo tanto el polen puede salir despedido en cualquier dirección.



El movimiento browniano afecta a cualquier partícula minúscula suspendida en un líquido o gas. También se observa en partículas de mayor tamaño, como las partículas del humo que flotan en el aire si se miran a través de una lente de aumento. La magnitud del choque que recibe la partícula depende del momento de las moléculas. Así que cuando las moléculas del líquido o del gas son pesadas o cuando se mueven con gran rapidez, por ejemplo cuando el fluido está caliente, se aprecian muchos más choques.

Las operaciones matemáticas que subyacen al movimiento browniano fueron desarrolladas a finales del siglo XIX, pero fue Einstein quien llamó la atención de los físicos sobre ellas en su artículo de 1905, el mismo año en que publicó su teoría de la relatividad y una explicación del efecto fotoeléctrico que le valió el Premio Nobel. Einstein tomó prestada la teoría del calor, que también se basaba en colisiones moleculares, para explicar con éxito los movimientos precisos observados por

Brown. Al ver que el movimiento browniano proporcionaba pruebas de la existencia de las moléculas en los fluidos, los físicos se vieron obligados a aceptar la teoría de los átomos, que continuaba siendo cuestionada incluso entrado el siglo XX.

Difusión

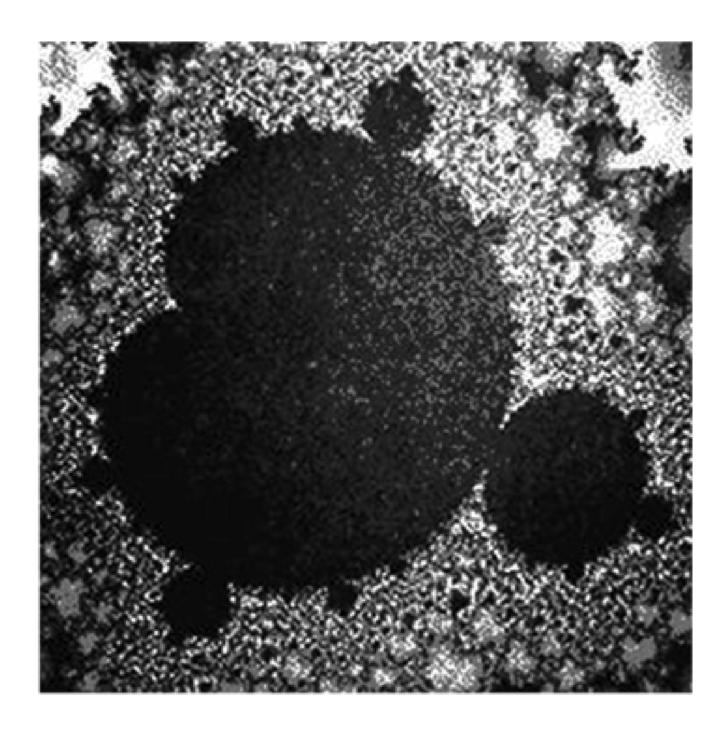
Con el tiempo, el movimiento browniano puede hacer que las partículas se desplacen a una distancia considerable, pero nunca tan lejos como si avanzaran en línea recta sin encontrar obstáculos. Esto se debe a que es más probable que la aleatoriedad envíe a una partícula de vuelta hacia atrás mientras la mueve hacia delante. Así pues, si tiramos un grupo de partículas en un punto de algún líquido se difundirá hacia fuera incluso aunque nadie lo remueva ni haya corrientes dentro del líquido. Cada partícula rodará siguiendo su propio camino, haciendo que la gota concentrada se extienda en una nube difusa. Esta difusión resulta de gran importancia para la extensión de la contaminación a partir de una fuente, como un aerosol en la atmósfera. Aunque no haya viento en absoluto las sustancias químicas se difundirán debido únicamente al movimiento browniano.

Fractales

La trayectoria seguida por una partícula que experimenta el movimiento browniano es un ejemplo de fractal. Cada paso del camino puede ser de cualquier tamaño y en cualquier dirección, pero surge un patrón global. Este patrón contiene en su interior una estructura a todas las escalas, desde los contornos más diminutos a otros de considerables dimensiones. Ésta es la característica definitoria de un fractal.

Los fractales fueron definidos por Benoit Mandelbrot en los años sesenta y setenta como manera de cuantificar las formas autosimilares. Si lo expresamos sintéticamente, los fractales son patrones que tienen esencialmente la misma apariencia en una misma escala. Si hacemos esencialmente la misma la misma apariencia en una misma escala. Si hacemos un zoom sobre un pequeño fragmento del patrón es imposible distinguirlo del patrón a gran escala, de tal forma que no se puede decir cuál es el aumento simplemente con mirarlo. Estos patrones repetitivos y sin escala aparecen con frecuencia en la naturaleza, por ejemplo en las líneas costeras, las ramas de los árboles, las hojas de los helechos o la simetría de seis

lados de un copo de nieve.



Las dimensiones fractales surgen porque su longitud o dimensión dependen de la escala a la que se miren. Si medimos la distancia entre dos ciudades por la costa, podemos afirmar que hay 30 kilómetros entre Land's End y Mount's Bay, pero si tenemos en cuenta todas las rocas una por una y medimos cada una de ellas con un trozo de cuerda, para poder hacerlo seguramente necesitaremos una cuerda de un centenar de kilómetros. Si fuéramos más lejos y midiéramos cada grano de arena de la costa haría falta un trozo de cuerda de cientos de kilómetros de longitud. De modo que la longitud absoluta en este caso depende de la escala a la que se mida. Si nos alejamos hasta que todo se vuelva borroso, volveremos a los familiares 30 kilómetros. En este sentido, las dimensiones fractales miden el carácter aproximado de algo, ya sea una nube, un árbol o una cadena montañosa. Muchas de estas formas fractales, como el contorno del litoral, son producidas por una serie de fases de un movimiento aleatorio, y de ahí su vínculo con el movimiento browniano.

Las matemáticas del movimiento browniano, o de una secuencia de movimientos, se pueden utilizar para generar patrones fractales que resultan de gran utilidad en múltiples áreas científicas. Se pueden crear paisajes rústicos virtuales con

montañas, árboles y nubes para los juegos de ordenador o bien utilizarlos en programas para dibujar mapas espaciales que ayuden a los robots a conducirse por los terrenos rugosos, modelando sus crestas y grietas. Los médicos los encuentran muy útiles para la formación de imágenes médicas cuando necesitan analizar la estructura de partes complejas del cuerpo, como los pulmones, en que las estructuras ramificadas discurren desde una escala bastante grande hasta otra diminuta.

Las ideas sobre el movimiento browniano también son de gran utilidad para predecir riesgos y sucesos futuros que son el resultado final de diversos sucesos aleatorios, como inundaciones o fluctuaciones de los mercados de valores. El mercado de valores cuyos precios varían al azar, igual que el movimiento browniano de un conjunto de moléculas. El movimiento browniano también participa en la configuración de otros procesos sociales como los de manufactura y toma de decisiones. Los movimientos aleatorios del movimiento browniano han tenido una amplia repercusión y han hecho acto de presencia bajo numerosas apariencias, no sólo como un baile de hojas en una agradable taza de té.

Cronología

aprox. 420 a. C.	Demócrito postula la existencia de los átomos.
1827 d. C.	Brown observa el movimiento del polen y propone el mecanismo.
1905 d. C.	Einstein determina las matemáticas que subyacen al movimiento browniano.
década de 1960 d. C.	Mandelbrot descubre los fractales.

La idea en síntesis: una danza microscópica invisible

12. Teoría del caos

La teoría del caos afirma que pequeños cambios en las circunstancias pueden tener consecuencias importantes más adelante. Si salimos de casa 30 segundos después, además de perder el autobús quizá también nos hayamos perdido un encuentro con alguien que iba a redirigirnos a un nuevo trabajo, cambiando el rumbo de nuestra vida para siempre. La teoría del caos se aplica sobre todo al tiempo meteorológico, donde un ligero remolino de viento puede desencadenar un huracán al otro lado del planeta, el llamado «efecto mariposa». Sin embargo, el caos no es caótico en sentido literal, pues da origen a algunos patrones.

El aleteo de una mariposa en Brasil puede ocasionar un tornado en Texas. Eso dice la teoría del caos. La teoría del caos reconoce que algunos sistemas pueden producir comportamientos muy diferentes aunque tengan puntos de partida muy similares. El tiempo atmosférico es uno de estos sistemas. Un leve cambio de temperatura o presión en un lugar puede desencadenar una cadena de acontecimientos posteriores que a su vez disparan un aguacero en otro sitio.

El caos es un término un tanto equívoco. No es caótico en el sentido de que sea completamente desenfrenado, impredecible o desestructurado. Los sistemas caóticos son deterministas, es decir, que si conocemos el punto de partida exacto son predecibles y también reproducibles. La física simple describe la serie de sucesos que se desarrollan, que es igual cada vez que se hace. Pero si nos fijamos en un resultado final, es imposible remontarse hacia atrás y determinar de dónde procedía, ya que hay diversos caminos que pueden haber conducido a ese resultado. Esto se debe a que las diferencias entre las condiciones que provocaron uno y otro resultado eran diminutas, incluso imposibles de medir. Así pues, los resultados diferentes proceden de ligerísimos cambios en los valores de entrada. A causa de esta divergencia, si no se está seguro sobre los valores de entrada, la variedad de los comportamientos subsiguientes es enorme. En términos de tiempo atmosférico, si la temperatura del remolino de viento difiere en tan sólo una

fracción de grado de lo que usted cree, entonces sus predicciones pueden resultar totalmente erróneas y el resultado podría ser quizá no una violenta tormenta, pero sí una ligera llovizna o un feroz tornado en la ciudad vecina. Los meteorólogos están, por tanto, limitados en lo anticipadamente que pueden pronosticar el tiempo. Incluso con las ingentes cantidades de datos sobre el estado de la atmósfera, suministrados por los enjambres de satélites que giran alrededor de la Tierra y las estaciones meteorológicas diseminadas en su superficie, los meteorólogos sólo pueden predecir patrones de tiempo atmosférico con unos pocos días de antelación. Más allá de esto, las incertidumbres pasan a ser enormes debido al caos.

Desarrollo

La teoría del caos fue desarrollada seriamente en la década de 1960 por Edward Lorenz. Mientras utilizaba un ordenador para desarrollar modelos de tiempo atmosférico, Lorenz se percató de que su código generaba patrones meteorológicos de salida enormemente diferentes únicamente porque los números de entrada se redondeaban de una forma distinta. Para facilitar sus cálculos había dividido las simulaciones en diversos fragmentos y trató de reanudarlos por la mitad en lugar de hacerlo desde el principio, imprimiendo números y volviéndolos a copiar después a mano. En el listado que él había copiado, los números se redondeaban con tres decimales, pero la memoria del ordenador manejaba cifras con seis decimales. De modo que cuando 0,123456 fue sustituido por la forma más corta 0,123 en mitad de la simulación, Lorenz observó que el tiempo atmosférico resultante era totalmente diferente. Sus modelos eran reproducibles y, por tanto, no aleatorios, pero las diferencias eran difíciles de interpretar. ¿Por qué un cambio minúsculo en su código producía un maravilloso tiempo despejado en una simulación y una tormenta catastrófica en otra?

Al analizarlo con mayor detalle se vio que los patrones meteorológicos resultantes se limitaban a un conjunto determinado, que él denominó atractor. No era posible producir un tipo cualquiera de tiempo atmosférico variando los datos de entrada, sino que más bien se propiciaban un conjunto de patrones meteorológicos aunque fuera difícil predecir con antelación exactamente cuál se derivaría de los datos numéricos de entrada. Éste es un rasgo clave de los sistemas caóticos: siguen

patrones generales, pero no se puede retroproyectar un punto final específico hasta un dato de entrada inicial particular porque los caminos potenciales que conducen a esos resultados se superponen.

El efecto mariposa

La principal idea del caos, que los pequeños cambios pueden tener grandes consecuencias más adelante, es a menudo aludida como el «efecto mariposa» por la representación de Lorenz de la criatura que bate las alas y provoca un tornado. Esta idea, que esencialmente se refiere al viaje en el tiempo, ha sido ampliamente utilizada en el cine y en la literatura popular, por ejemplo, en la película titulada El efecto mariposa e incluso en Parque Jurásico. En la película de 1946 ¡Qué bello es vivir!, un ángel muestra a George, el protagonista, que su ciudad natal habría sido un lugar mucho más desolado si él no hubiese nacido. El ángel le dice: «Has recibido un gran regalo, George: la oportunidad de ver cómo sería el mundo sin ti». George averigua que su propia existencia salvó a un hombre de morir ahogado y que la suya es realmente una vida maravillosa.

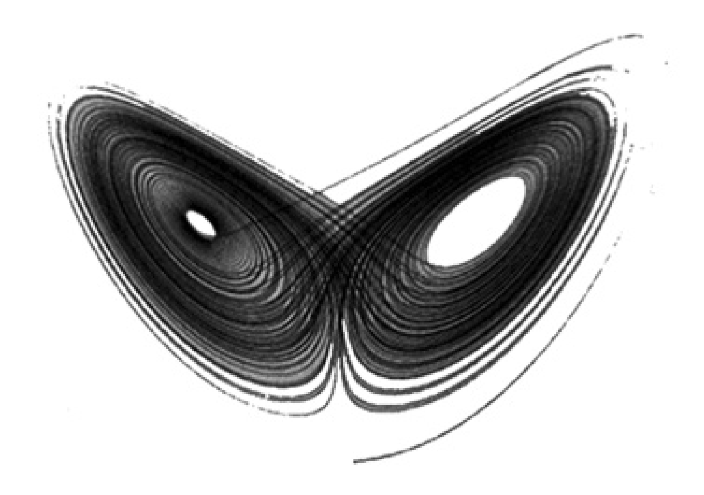
Las conexiones entre los datos de entrada y de salida pueden registrarse en un gráfico para mostrar el rango de comportamientos que presenta un sistema caótico particular. Este tipo de gráfico refleja las soluciones del atractor, que a veces se denominan «atractores extraños». Un famoso ejemplo es el atractor de Lorenz, que tiene el aspecto de varias figuras de ochos solapadas, ligeramente movidas y distorsionadas, que recuerdan la forma de las alas de una mariposa.

La teoría del caos surgió en la misma época en que se descubrieron los fractales con los que guarda una estrecha relación. Los mapas de atractores de soluciones caóticas para muchos sistemas pueden aparecer como fractales, en los que la fina estructura del atractor contiene otra estructura a muchas escalas.

Primeros ejemplos

Aunque la disponibilidad de los ordenadores hizo arrancar realmente la teoría del

caos, al permitir a los matemáticos calcular repetidamente comportamientos para diferentes datos numéricos de entrada, mucho antes ya se habían detectado sistemas más simples que mostraban un comportamiento caótico.



Por ejemplo, a finales del siglo XIX, ya se aplicaba el caos a la trayectoria de las bolas de billar y a la estabilidad de las órbitas.

Jacques Hadamard estudió las matemáticas del movimiento de una partícula en una superficie curva, como una bola en un partido de golf, lo que se conoce como billar de Hadamard. En algunas superficies, la trayectoria de las partículas se convertía en inestable y se caían por el borde. Otras permanecían en el tapete, pero seguían una trayectoria variable. Al cabo de poco, Henri Poincaré también descubrió soluciones no repetitivas para las órbitas de tres cuerpos bajo la acción de la gravedad, como por ejemplo, la Tierra y dos lunas, comprobando nuevamente que las órbitas eran inestables. Los tres cuerpos giraban unos alrededor de otros en bucles en continuo cambio, pero no se separaban. A continuación los matemáticos trataron de desarrollar esta teoría del movimiento de un sistema de muchos cuerpos, conocida como teoría ergódica, y la aplicaron a los fluidos turbulentos y a las oscilaciones eléctricas en los circuitos

«¡Todos los hombres que viajaban en su interior murieron! Harry no estaba allí para salvarlos ¡porque tú no estabas allí para salvar a Harry! Ya ves, George: has tenido una vida maravillosa de verdad. ¿No ves que sería un gran error tirarla por la borda?» ¡Qué bello es vivir!, 1946

de radio. A partir de los años cincuenta, la teoría del caos se desarrolló muy rápidamente al tiempo que se descubrían nuevos sistemas caóticos y se introducían las máquinas computadoras digitales para facilitar los cálculos. El ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer, Computador e Integrador Numérico Electrónico), una de las primeras computadoras, se utilizaba para realizar pronósticos meteorológicos e investigar el caos.

El comportamiento es muy común en la naturaleza. Además de afectar al clima y al movimiento de otros fluidos, el caos se produce en numerosos sistemas de muchos cuerpos, incluyendo las órbitas planetarias. Neptuno tiene más de una docena de lunas. En lugar de seguir las mismas trayectorias cada año, el caos hace que las lunas de Neptuno reboten de aquí para allá siguiendo órbitas inestables que cambian año tras año. Algunos científicos piensan que la disposición ordenada de nuestro propio sistema solar puede acabar finalmente en el caos.

Cronología

1898 d. C.	El billar de Hadamard muestra un comportamiento caótico.
1961 d. C.	Lorenz trabaja en los pronósticos meteorológicos.
2005 d. C.	Se descubre que las lunas de Neptuno orbitan de forma caótica.

La idea en síntesis: orden en el caos

13. La ecuación de Bernoulli

La relación entre la velocidad y la presión de los fluidos en circulación viene dada por la ecuación de Bernoulli. Ésta determina por qué vuelan los aviones, cómo circula la sangre en el cuerpo y cómo se inyecta el combustible en el motor de los coches. Los fluidos que circulan a gran velocidad crean una baja presión que explica el impulso asociado al ala de una nave y al estrechamiento de un chorro de agua que sale de un grifo. Utilizando este efecto para medir la presión sanguínea, el propio Daniel Bernoulli insertó cánulas directamente en las venas de sus pacientes.

Cuando abrimos un grifo, la columna de agua que sale es más estrecha que la abertura del propio grifo. ¿Por qué? ¿Y qué relación guarda esto con el vuelo de los aviones y las angioplastias?

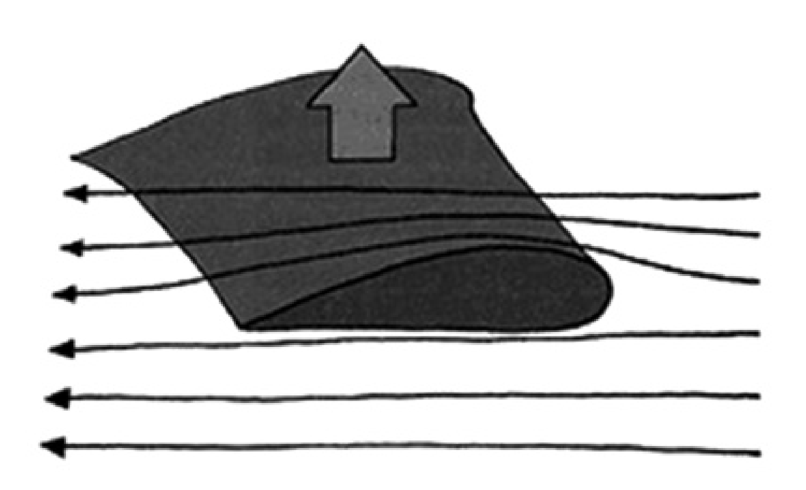
El físico y médico holandés Daniel Bernoulli comprendió que el agua en movimiento genera una baja presión. Cuanto más rápidamente fluye, más baja es la presión. Si imaginamos un tubo de cristal vacío colocado horizontalmente con agua que se bombea por su interior, podremos medir la presión de esa agua insertando un tubo capilar vacío verticalmente en la primera tubería y observando cómo cambia la altura en el tubo de menor tamaño. Si la presión del agua es elevada, el nivel del agua en el tubo capilar aumenta. Si es baja, disminuye.

Cuando Bernoulli aumentó la velocidad del agua en el tubo horizontal observó un descenso en la presión del tubo capilar vertical; este descenso en la presión resultó ser proporcional al cuadrado de la velocidad del agua. Así pues, cualquier agua o fluido en movimiento tiene una presión más baja que el agua en reposo. El agua que sale de un grifo tiene una presión baja comparada con el aire inmóvil que la rodea y, por tanto, es absorbida en una columna más estrecha. Esto se aplica a cualquier fluido, desde el agua hasta el aire.

La circulación de la sangre

Por su formación médica, el propio Bernoulli se sentía fascinado por la circulación

de la sangre en el cuerpo humano e inventó una herramienta para poder medir la presión arterial. Un tubo capilar, que se insertaba en un vaso sanguíneo, fue utilizado durante casi doscientos años para medir la presión sanguínea en los pacientes vivos. Debió de resultar un alivio para todos los afectados cuando se descubrió un método menos invasivo.



Igual que el agua en una cañería, la sangre arterial es bombeada por el corazón con un gradiente de presión que se establece a lo largo de la longitud del vaso. Si una arteria se estrecha, la velocidad de la sangre que circula por el estrechamiento aumenta de acuerdo con la ecuación de Bernoulli. Si el vaso es la mitad de estrecho, la sangre que circula por su interior es cuatro veces más rápida (dos al cuadrado). Esta aceleración del flujo sanguíneo a través de arterias con estrechamientos puede ocasionar problemas. En primer lugar, si su velocidad es lo bastante rápida, el flujo puede hacerse turbulento y producirse remolinos. Una turbulencia cerca del corazón produce soplos cardíacos con un sonido característico que los médicos reconocen. Además, el descenso de presión en el área limitada puede absorber la fina pared arterial, agravando aún más el problema. Si la arteria se expande, mediante una angioplastia, el volumen del flujo aumentará de nuevo y todo volverá a su cauce normal.

Impulso

El descenso en la presión con la velocidad del fluido tiene otras consecuencias

importantes. Los aviones vuelan porque las ráfagas de aire que cortan las alas del avión también producen un descenso de la presión. Las alas de la nave tienen una forma tal que la curvatura del borde superior es mayor que la del borde inferior. Como el recorrido es más largo encima de la parte superior, el aire se mueve más rápido en la superficie superior del ala, de forma que la presión es más baja en ese punto que en la parte inferior. La diferencia de presión impulsa al ala y permite volar al avión. Pero un avión pesado tiene que moverse muy rápido para ganar la suficiente diferencia de presión que le proporcione el impulso necesario para despegar.

DANIEL BERNOULLI (1700-1782)

El físico holandés Daniel Bernoulli recibió una formación en medicina para cumplir con los deseos de su padre, pero en realidad él adoraba las matemáticas. Su padre Johan era matemático, pero trató de convencer a Daniel para que no siguiera sus pasos, y compitió con su hijo a lo largo de toda su carrera. Bernoulli concluyó sus estudios médicos en Basilea, pero en 1724 se convirtió en profesor de matemáticas en San Petersburgo. Trabajó con el matemático Leonhard Euler en fluidos, estableció la relación entre velocidad y presión experimentando con tubos que, finalmente, fueron utilizados por los médicos para medir la presión sanguínea insertándolos en las arterias. Bernoulli se percató de que el flujo y la presión de los fluidos estaban relacionados con la conservación de la energía y demostró que si la velocidad aumenta la presión desciende. Daniel obtuvo una plaza para regresar a Basilea en 1733, pero Johan todavía estaba celoso de los éxitos de su hijo. Odiaba tenerle en el mismo departamento e incluso le prohibió volver a su casa. A pesar de todo, Daniel dedicó a su padre su obra Hidrodinámica, escrita en 1734. Pero el Bernoulli mayor robó las ideas de Daniel, publicando un libro similar llamado Hidráulica al cabo de poco tiempo. Daniel, trastornado por este plagio, volvió a la medicina y ejerció durante el resto de su vida.

Un efecto similar explica cómo se inyecta el combustible en el motor de un coche a través del carburador. Una tobera especial, llamada tubo de Venturi (un amplio tubo con un estrangulamiento en medio), produce una baja presión del aire, limitando y liberando a continuación el flujo, el cual absorbe el combustible y distribuye una mezcla de aire y combustible al motor.

Conservación

Daniel Bernoulli llegó a estas conclusiones pensando en la conservación de la energía aplicada a los fluidos. Los fluidos, incluyendo los líquidos y el aire, son sustancias continuas que pueden deformarse constantemente. Pero tienen que seguir las leyes básicas de la conservación, no sólo de la energía, sino también de la masa y el momento. Dado que cualquier fluido en movimiento siempre está reordenando sus átomos, éstos tienen que seguir las leyes del movimiento enunciadas por Newton y otros. Así pues, en la descripción de cualquier fluido, los átomos no se pueden crear, ni destruir, sino que se mueven de un lado a otro. Hay que tener en cuenta sus mutuas colisiones y que cuando chocan, la velocidad es predicha por la conservación del momento lineal. Además, la cantidad total de energía adquirida por todas las partículas tiene que ser fija y sólo puede trasladarse dentro del sistema.

«Las máquinas voladoras más pesadas que el aire son imposibles. No tengo el menor ápice de fe en la navegación aérea salvo los globos, ni en las expectativas de buenos resultados de cualquiera de las que oímos hablar.»
Lord Kelvin, 1895

En la actualidad, estas leyes físicas se utilizan para trazar un modelo del comportamiento de los fluidos tan diverso como los patrones meteorológicos, las corrientes oceánicas, la circulación de los gases en las estrellas y las galaxias, y la circulación de fluidos en nuestro cuerpo. Las predicciones meteorológicas se apoyan en los modelos realizados por ordenador de los movimientos de muchos átomos junto con la termodinámica para explicar los cambios en el calor mientras los átomos se mueven y cambia la densidad, la temperatura y la presión regionalmente. Nuevamente, los cambios en la presión y la velocidad están relacionados, ya que hacen que los vientos circulen

de alta a baja presión. Las mismas ideas se utilizaron para elaborar el modelo de la trayectoria del huracán Katrina cuando se precipitó contra la costa americana en 2005.

Las leyes de la conservación están encarnadas en una serie de nuevas ecuaciones llamadas ecuaciones de Navier-Stokes, por los científicos que las desarrollaron. También tienen en cuenta los efectos de la viscosidad de los fluidos, su adherencia, debido a las fuerzas entre las moléculas que los componen. Al ocuparse de la conservación más que de la predicción absoluta, estas ecuaciones analizan los cambios y la circulación de las partículas del fluido por término medio en lugar de seguir el número total de átomos.

Pese a que las ecuaciones de Navier-Stokes de la dinámica de fluidos son lo bastante detalladas para explicar muchos sistemas complejos, como los fenómenos climáticos incluyendo El Niño y los huracanes, no son capaces de describir flujos muy turbulentos, como la estrepitosa caída de una cascada o el chorro de una fuente. La turbulencia es el movimiento aleatorio del agua agitada, que se caracteriza por torbellinos e inestabilidad. Se establece cuando el flujo es muy veloz y desestabilizado. Como la turbulencia es tan difícil de describir matemáticamente, todavía se ofrecen importantes premios en metálico para los científicos que den con nuevas ecuaciones capaces de describir estas situaciones extremas.

Cronología

1738 d. C.	Bernoulli descubre que un aumento en la velocidad de los fluidos provoca un descenso de la presión.
1896 d. C.	Se inventa una técnica no invasiva para medir la presión sanguínea.
1903 d. C.	Los hermanos Wright, con unas alas inspiradas por Bernoulli, hacen volar el primer avión.

La idea en síntesis: arterias y aerodinámica

Sección 2
LAS ONDAS

14. Teoría del color de Newton

Todos nos hemos maravillado ante la belleza de un arco iris. Isaac Newton explicó cómo se forman. Al pasar luz blanca por un prisma de cristal, descubrió que se dividía en un arco iris de colores y demostró que los colores eran inherentes a la luz blanca y que no procedían del prisma. La teoría del color de Newton fue controvertida en su época, pero desde entonces ha influido en generaciones de artistas y científicos.

Si hacemos pasar un haz de luz blanca por un prisma, los rayos emergentes se descompondrán en un arco iris de color. El arco iris aparece en el cielo de la misma forma cuando la luz solar es dividida por las gotas de agua en el familiar espectro de colores: rojo, naranja, amarillo, verde, azul, índigo y violeta.

Una mezcla de todos

Al experimentar con luz y prismas en sus aposentos en la década de 1660, Isaac Newton demostró que los numerosos colores de la luz podían combinarse para formar la luz blanca. Los colores eran las unidades básicas en lugar de estar compuestos por otras mezclas o por el propio prisma de cristal como se creía hasta entonces. Newton separó los haces de luz roja y azul y demostró que esos colores por separado no se dividían en nada más al pasarlos por otros prismas.

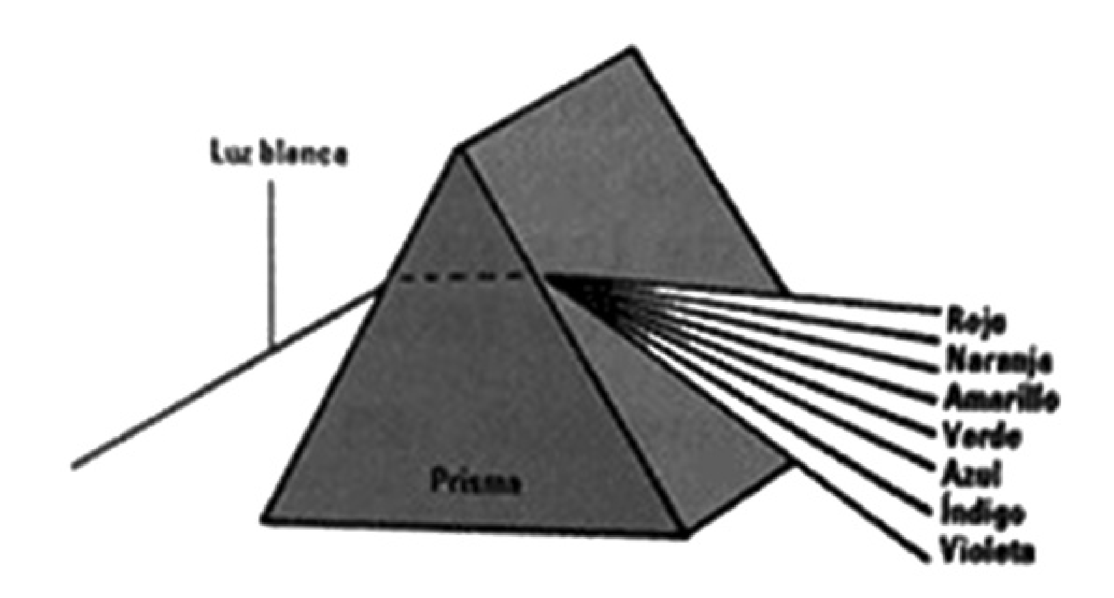
«La naturaleza y sus leyes yacían ocultas en la noche; dijo Dios "que sea Newton" y se hizo la luz.» Alexander Pope, 1727 (epitafio de Newton)

Aunque hoy en día esto resulta del todo evidente para nosotros, la teoría del color de Newton fue muy polémica en su época. Sus coetáneos argumentaron ferozmente contra ella, pues preferían creer que los colores surgían de una combinación de luz blanca y oscuridad, como si fuera una especie de sombra. Las batallas más encarnizadas de Newton se

desarrollaron contra su igualmente famoso contemporáneo Robert Hooke. Ambos discutieron públicamente sobre la teoría del color durante toda su vida. Hooke prefería creer que la luz de color era una huella, como si miráramos a través de un cristal con manchas.

Para apoyar sus afirmaciones citó numerosos ejemplos de efectos lumínicos con colores inusuales en la vida real y criticó a Newton por no realizar más experimentos.

Newton también observó que los objetos en una habitación iluminada aparecen coloreados porque dispersan o reflejan la luz de ese color, y que el color no es una cualidad de los objetos.



Un sofá rojo refleja básicamente la luz roja y una mesa verde refleja la luz verde. Un cojín turquesa refleja la luz azul y un poco de amarillo. Los demás colores surgen de la combinación de estos tipos básicos de luz.

Ondas lumínicas

Para Newton comprender el color era un medio para cuestionar la física de la propia luz. Al realizar nuevos experimentos, llegó a la conclusión de que la luz se comporta en muchos sentidos como las ondas marinas. La luz se curva alrededor de los obstáculos de la misma forma que las olas del mar rodean la pared del puerto. Los

haces de luz también se pueden unir para reforzar o anular su brillo, igual que ocurre cuando las olas se superponen. Del mismo modo que las ondas marinas son movimientos a gran escala de moléculas de agua invisibles, Newton creía que las ondas lumínicas eran en el fondo ondas electromagnéticas —ondas que reunían campos eléctricos y magnéticos—, y no la reverberación de partículas sólidas. Cuando se descubrió el comportamiento de la luz como una onda electromagnética, la idea de corpúsculo de Newton quedó postergada. Sin embargo, fue resucitada de una forma nueva cuando Einstein demostró que la luz también se comportaba a veces como una corriente de partículas que transportan energía, pero carecen de masa.

El movimiento ondulatorio aparece de numerosas formas. Hay dos tipos básicos de ondas: longitudinales y transversales. Las ondas longitudinales u ondas de compresión se obtienen cuando los pulsos que producen la onda actúan en la misma dirección en que ésta se desplaza, originando una serie de crestas de altas y bajas presiones. Las ondas del sonido causadas, por ejemplo, por la piel de un tambor que vibra en el aire son longitudinales, como también las ondas de las patas de un ciempiés cuando se acercan y se alejan con un crujido a medida que la criatura se arrastra. Por su parte, las ondas lumínicas y marinas son transversales porque la alteración original actúa formando un ángulo recto con la dirección en la que se desplaza la onda. Si estiramos un extremo de un resorte Slinky de un lado a otro, una onda transversal se desplazará a lo largo del muelle aunque el movimiento de su mano sea perpendicular a éste. De la misma forma, una serpiente traza una onda transversal al deslizarse, utilizando el movimiento de un lado a otro para impulsarse hacia delante. Las olas también son transversales porque las moléculas individuales de agua flotan arriba y abajo mientras que la propia ola viaja hacia el horizonte. A diferencia de las olas, el movimiento transversal de las ondas lumínicas se debe a cambios en la intensidad de los campos eléctricos y magnéticos que están alineados de forma perpendicular a la dirección de la propagación de las ondas.

Por todo el espectro

Los diferentes colores de la luz reflejan las diferentes longitudes de onda de estas

ondas electromagnéticas. La longitud de onda es la distancia medida entre las crestas consecutivas de una onda. Cuando pasa a través de un prisma, la luz blanca se separa en muchos colores porque cada tono se asocia con una longitud de onda diferente y, por tanto, éstas son desviadas en diversos grados por el cristal. El prisma curva las ondas lumínicas en un ángulo que depende de la longitud de onda de la luz, siendo la luz roja la que se curva menos y la azul la que más, para producir la secuencia de colores del arco iris. El espectro de luz visible aparece en orden de longitudes de onda, desde el rojo con la más larga pasando por el verde hasta el azul con la más corta.

El disco de los colores

Newton ordenó los colores del arco iris desde el rojo hasta el azul y los pintó en un disco circular, de forma que podía enseñar el modo en que se combinaban los colores. Los colores primarios (rojo, amarillo y azul) estaban espaciados y cuando se combinaban en diferentes proporciones producían todos los demás colores intermedios. Los colores complementarios, como el verde y el naranja, se colocaban en lugares opuestos. Muchos artistas se interesaron por la teoría del color de Newton, y sobre todo por su disco de colores, el cual era de gran ayuda a la hora de pintar contrastando tonos y con efectos de iluminación. Los colores complementarios alcanzaban su máximo contraste o eran útiles para pintar sombras.

¿Qué hay en cualquiera de los extremos del arco iris? La luz visible no es más que una parte del espectro electromagnético. Es tan importante para nosotros porque nuestros ojos se han desarrollado para utilizar esta parte sensible del espectro. Mientras las longitudes de onda de la luz visible se mantienen aproximadamente a la misma escala que los átomos y las moléculas (cientos de miles de millonésimas de metro), las interacciones entre luz y átomos en un material son considerables. Nuestros ojos han evolucionado para utilizar la luz visible porque es muy sensible a la estructura atómica. Newton estaba fascinado por el funcionamiento del ojo;

incluso llegó a clavarse una aguja de coser en la parte posterior de su propio ojo para ver cómo afectaba esta presión a su percepción del color.

Más allá de la luz roja llegamos a la infrarroja, con longitudes de onda de millonésimas de metro. Los rayos infrarrojos transmiten el calor del Sol y también son captados por gafas de visión nocturna para «ver» el calor que emiten los cuerpos. Más largas aún son las microondas, con longitudes de onda comprendidas entre 1 cm y 1 mm, y las ondas de radio, con longitudes de onda de 1 m o superiores. Los hornos microondas utilizan ondas electromagnéticas en la frecuencia de microondas para remover las moléculas de agua de los alimentos, calentándolos. En el otro extremo del espectro, más allá del azul, encontramos la luz ultravioleta. Es emitida por el Sol y puede perjudicar enormemente nuestra piel, aunque una gran parte es filtrada por la capa de ozono que cubre la Tierra. A longitudes de onda más cortas encontramos los rayos-X (utilizados en los hospitales por su gran penetración en los tejidos humanos) y a las longitudes de onda más pequeñas están los rayos gamma.

Aplicaciones

Mientras Newton dilucidaba la física de la luz, los filósofos y artistas continuaban interesados en nuestra percepción de los colores. En el siglo XIX, el erudito alemán Johan Wolfgang von Goethe investigó la forma en que el ojo y la mente humana interpretan los colores cuando están dispuestos unos junto a otros. Goethe introdujo el magenta en el disco de los colores de Newton (véase el recuadro) y descubrió que las sombras a menudo adoptan el color opuesto al del objeto iluminado, de forma que tras un objeto rojo aparece una sombra azul. El disco de los colores de Goethe actualizado continúa siendo la opción de los artistas y diseñadores actuales.

Cronología:

1672 d. C.	Newton explica el arco iris.
1810 d. C.	Goethe publica su tratado del color.
1905 d. C.	Einstein demuestra que la luz se puede comportar como una partícula en determinadas circunstancias.

La idea en síntesis: más allá del arco iris

15 Principio de Huygens

Si tiramos una piedra en un estanque, se forman unas ondas circulares que se van haciendo cada vez más grandes. ¿Por qué se expanden? ¿Y cómo se puede predecir este comportamiento cuando tropiezan con un obstáculo, como el tocón de un árbol, o retornan desde el borde del estanque? El principio de Huygens es una herramienta para explicar el movimiento de las ondas al imaginar que cada punto de un frente de onda constituye una nueva fuente de ondas.

El físico holandés Christiaan Huygens discurrió una forma práctica de predecir la progresión de las ondas. Pongamos que lanzamos un guijarro al lago y que se producen anillos de ondas. Si imaginamos un que una de las ondas circulares se congela en un momento determinado del tiempo, cada punto de esa onda circular es una nueva fuente de ondas circulares cuyas propiedades son iguales que las de la onda congelada. Es como si se lanzara un anillo de piedras simultáneamente al agua siguiendo el contorno de la primera onda. Este conjunto de alteraciones subsiguientes amplía aún más la onda y las nuevas posiciones marcan los puntos de partida de otro conjunto de fuentes de energía ondulatoria en expansión. Si repetimos el principio muchas veces podemos seguir la pista a la evolución de la onda.

Paso a paso

La idea de que cada punto del frente de onda actúa como una nueva fuente de energía de ondas, con una frecuencia y una fase iguales, se denomina principio de Huygens. La frecuencia de una onda es el número de ciclos de ondas que tienen lugar en un período de tiempo determinado y la fase de una onda identifica en qué punto está del ciclo. Por ejemplo, todas las crestas de onda tienen la misma fase y todos los valles están a medio ciclo de distancia. Si imaginamos una ola en el océano, la distancia entre dos picos de ola, conocida como longitud de onda, es quizá de 100 metros. Su frecuencia, o el número de longitudes de onda que pasan

por un punto determinado en un segundo, podría ser de una longitud de onda de 100 metros en 60 segundos o 1 ciclo por minuto. Las ondas oceánicas más veloces son los tsunamis, que pueden alcanzar los 800 kilómetros por hora —la velocidad de un avión a reacción— disminuyendo de velocidad a décimas de kilómetro por hora y elevándose cuando alcanzan e inundan la costa.

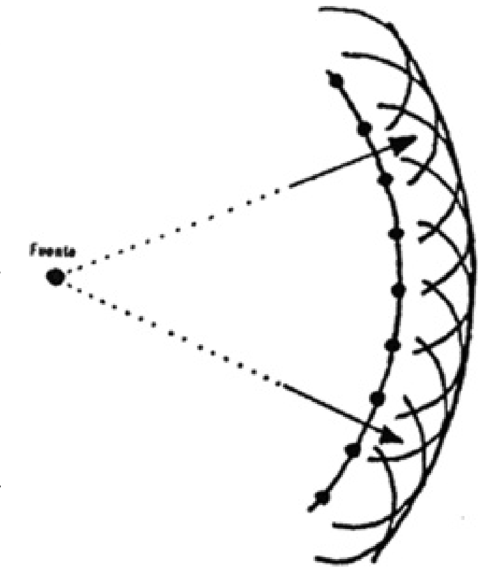
CHRISTIAAN HUYGENS (1629-1695)

Hijo de un diplomático holandés, Christiaan Huygens fue un físico aristócrata que colaboró ampliamente con científicos y filósofos de toda Europa en el siglo XVII, incluyendo nombres tan famosos como los de Newton, Hooke y Descartes. Las primeras publicaciones de Huygens se centraban en problemas matemáticos, pero también se dedicó al estudio de Saturno. Era un científico práctico que patentó el primer reloj de péndulo y trató de diseñar un reloj náutico que pudiera usarse en el mar para calcular la longitud. Huygens viajó por toda Europa, sobre todo a París y Londres, donde conoció y trabajó con eminentes científicos sobre el péndulo, el movimiento circular, la mecánica y la óptica. Aunque trabajó sobre la fuerza centrífuga junto a Newton, Huygens pensaba que la teoría de la gravedad, con su concepción de una acción a distancia, era «absurda». En 1678 Huygens publicó su tratado sobre la teoría ondulatoria de la luz.

Para dibujar un gráfico del progreso de una onda, el principio de Huygens se puede aplicar una y otra vez a medida que tropieza con obstáculos y se cruza en el camino de otras ondas. Si se dibuja la posición de un frente de onda en un papel, la posición siguiente se puede describir utilizando unos compases para trazar círculos a lo largo de todo el frente de onda, y trazando una línea continua a lo largo de los bordes exteriores para determinar la posición de la siguiente onda.

La sencilla aproximación de Huygens describe las ondas en numerosas circunstancias. Una onda lineal continúa siendo recta mientras se propaga porque las ondículas circulares que genera en toda su longitud se suman para formar un

nuevo frente de onda lineal frente al primero. Sin embargo, si observamos conjuntos de ondas oceánicas lineales paralelas mientras pasan por una pequeña abertura del muro de un puerto, tras pasar por el agujero se distorsionan formando arcos.



Sólo pasa por él una onda recta de longitud muy corta y los arcos se forman en los bordes de este resto inalterado en el que, según el principio de Huygens, nacen nuevas ondas circulares. Si el agujero es pequeño comparado con la distancia entre las ondas domina el patrón de bordes curvados y la onda transmitida parece casi semicircular. Esta propagación de la energía de las ondas a cada lado del agujero se denomina difracción.

En 2004 un catastrófico tsunami originado por un terremoto en Sumatra atravesó el océano Índico a toda velocidad. Su fuerza en algunos lugares se vio disminuida porque la energía de las olas se diseminó por difracción al pasar por encima y entre las cadenas de islas.

¿Cree lo que oye?

El principio de Huygens también explica por qué si gritamos a alguien que se encuentra en otra habitación, éste oirá nuestra voz como si estuviéramos en el umbral de la puerta y no en la habitación de al lado. Según Huygens, cuando las ondas llegan al umbral, como sucede en la abertura del puerto, se crea un nuevo conjunto de fuentes similares de energía de ondas. Por lo tanto, todo lo que sabe la persona que escucha es que esas ondas se generan en el umbral de la puerta; el historial previo de estas ondas en la otra habitación se ha perdido.

Del mismo modo, si observamos una onda circular cuando alcanza el borde del estanque, su reflejo produce círculos invertidos. El primer punto de la onda que llega al borde actúa como una nueva fuente, de modo que se inicia la propagación hacia atrás de una nueva onda circular. De aquí que los reflejos de las ondas también se puedan describir mediante el principio de Huygens.

Si las olas de los océanos se mueven en aguas poco profundas, como en las proximidades de una playa, su velocidad cambia y los frentes de onda se curvan hacia el interior hacia las zonas más superficiales. Huygens describió esta «refracción» alterando los radios de las ondículas más pequeñas. Las ondículas lentas no se desplazan tan lejos como las más veloces, así que el nuevo frente de onda forma un ángulo con el original.

Huygens en Titán

La sonda espacial Huygens se posó en la superficie de Titán el 14 de enero de 2005, después de siete años de viaje. Alojada en el interior de un caparazón exterior protector de varios metros de grosor, la sonda Huygens iba provista de instrumental experimental para estudiar los vientos, la presión atmosférica, la temperatura y la composición de la superficie mientras descendía a través de su atmósfera para posarse en una llanura cubierta de hielo. Titán es un mundo extraño cuya atmósfera y superficie están húmedas a causa del metano líquido. Algunos piensan que este lugar pudo albergar formas primitivas de vida, como bacterias devoradoras de metano. Huygens fue la primera sonda espacial que se posó en un cuerpo fuera del sistema solar.

Una predicción poco realista del principio de Huygens es que si todas esas nuevas ondículas son fuentes de energía de ondas en sentido contrario además de una onda hacia delante. Entonces, ¿por qué se propaga una onda únicamente hacia delante? Huygens no tenía respuesta y se limitó a supone que la energía de las ondas se propaga hacia el exterior y que el movimiento dirigido al interior es ignorado. Por lo tanto, el principio de Huygens es, en realidad, una herramienta útil únicamente para predecir la evolución de las ondas más que una ley completamente explicativa.

Los anillos de Saturno

Además de reflexionar sobre las ondas, Huygens también descubrió los anillos de Saturno. Fue el primero en demostrar que el planeta estaba rodeado por un disco plano y no flanqueado por otras lunas o por una protuberancia ecuatorial variable. Dedujo que las mismas leyes físicas que explicaban las órbitas de las lunas, la gravedad de Newton, se podrían aplicar a numerosos cuerpos de menor tamaño que orbitasen en un anillo. En 1655, Huygens también descubrió la mayor de las lunas de Saturno, Titán. Exactamente 350 años más tarde, una nave espacial llamada Cassini llegó hasta Saturno, llevando consigo una pequeña sonda, bautizada como Huygens, que descendió a través de las nubes de la atmósfera de Titán para posarse en su superficie helada de metano. Titán posee continentes, dunas de arena, lagos e incluso hasta ríos, compuestos de metano y etano sólido y líquido en lugar de agua. Huygens se habría quedado asombrado al pensar que una sonda con su nombre viajaría un día por ese lejano mundo, pero el principio que lleva su nombre todavía se puede utilizar para establecer un modelo de las ondas extraterrestres que se han encontrado allí.

«Cada vez que un hombre defiende un ideal… transmite una onda diminuta de esperanza. Esas ondas se cruzan con otras desde un millón de centros de energía distintos y se atreven a crear una corriente que puede derribar los muros más poderosos de la opresión y la intransigencia.» Robert Kennedy, 1966 (epitafio de Newton)

Cronología

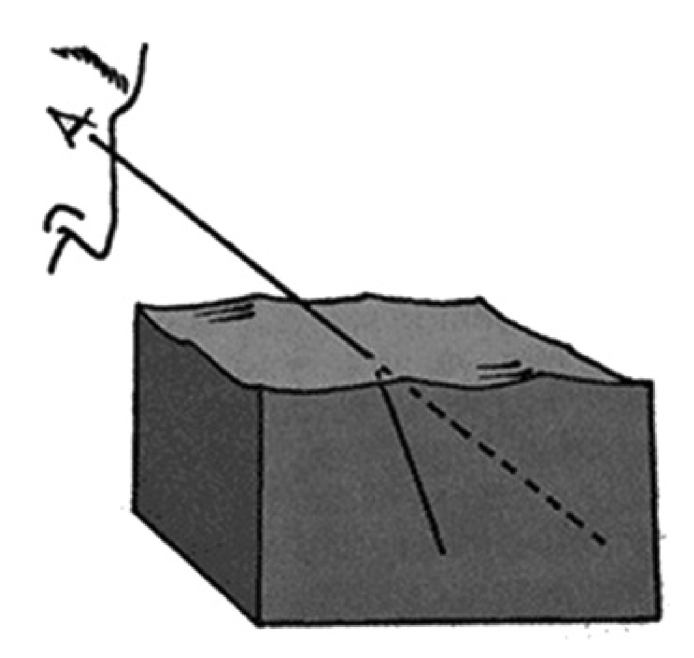
1655 d. C.	Huygens descubre Titán.
1678 d. C.	Se publica el tratado de Huygens sobre la teoría ondulatoria de la luz.
1873 d. C.	Las ecuaciones de Maxwell demuestran que la luz es una onda electromagnética.
2005 d. C.	La sonda Huygens se posa sobre Titán.

La idea en síntesis: la progresión de las ondas

16. La ley de Snell

¿Por qué aparece curvada una pajita dentro de un vaso de agua? Es porque la luz viaja a una velocidad diferente en el aire y en el agua, haciendo que los rayos se curven. La ley de Snell, que describe esta curvatura de los rayos del Sol, explica por qué aparecen espejismos como charcos en las carreteras calurosas y por qué la gente parece tener las piernas más cortas dentro de la piscina. En la actualidad se utiliza para ayudar a crear materiales más inteligentes que parezcan invisibles.

¿Quién no ha lanzado unas risitas al ver a su amiga en una piscina de aguas claras porque sus piernas parecen más cortas dentro del agua que fuera? ¿Se ha preguntado alguna vez por qué una pajita dentro de un vaso parece que está curvada? La ley de Snell nos ofrece la respuesta.



Cuando los rayos de luz atraviesan los límites entre dos materiales en los que la luz viaja a una velocidad diferente, por ejemplo, el aire y el agua, los rayos se curvan. Esto se denomina refracción. La ley de Snell describe el grado de curvatura que tiene lugar en las transiciones entre diferentes materiales y recibe su nombre del

matemático holandés del siglo XVII Willebrord Snellius, aunque en realidad él nunca llegó a publicarla. A veces se la conoce como ley de Snell-Descartes, ya que fue René Descartes quien publicó una demostración en 1637. Este comportamiento de la luz era bien conocido, pues aparece documentado ya en el siglo X, aunque no fue formalizado hasta varios siglos después.

La luz viaja a una velocidad menor en materiales más densos, como el agua o el cristal, en comparación con el aire. Así pues, un rayo de luz solar que viaja hacia una piscina se curva hacia el suelo de ésta cuando alcanza la superficie del agua. Como los rayos reflejados llegan a nuestros ojos en un ángulo más plano, curvándose al revés, suponemos que llegan hasta nosotros directamente y por eso las piernas de una persona que está dentro de la piscina parecen comprimidas. El espejismo de un charco en una carretera ardiente se forma de un modo parecido. La luz del cielo se curva al rozar la superficie del charco porque cambia de velocidad en la capa de aire caliente que está justo encima del ardiente asfalto. El aire caliente es menos denso que el fresco, así que la luz se curva desde la vertical y vemos el reflejo del cielo en el asfalto, que tiene todo el aspecto de un charco húmedo.

El ángulo de curvatura de un rayo guarda relación con la velocidad relativa a la cual viaja en ambos materiales: técnicamente la proporción de la velocidad nos da la proporción del seno del ángulo de incidencia (medido desde la vertical). Por tanto, para un rayo que pasa del aire al agua y a otras sustancias densas, el rayo se curva hacia dentro y su trayectoria se hace más empinada.

Índice de refracción

La luz viaja a la vertiginosa velocidad de 300 millones de metros por segundo en el vacío. La proporción entre su velocidad en un material más denso, como el cristal, y la del vacío se denomina índice de refracción del material. El vacío tiene por definición un índice de refracción de 1; una cosa con índice de refracción 2 haría disminuir la velocidad de la luz a la mitad de la que tiene en el espacio libre. Un índice de refracción alto significa que la luz se curva mucho cuando pasa por una sustancia.

Azúcar, azúcar

El índice de refracción es una herramienta útil en la fabricación de vino y en la de zumos de frutas. Los vinicultores utilizan un refractómetro para medir la concentración de azúcar en el zumo de uva antes de que éste se convierta en vino. El azúcar disuelto incrementa el índice de refracción del zumo y también indica cuánto alcohol va a contener.

El índice de refracción es una propiedad del propio material. Se pueden diseñar materiales con un índice de refracción específico, lo cual puede ser muy útil (p. ej. para diseñar lentes para gafas correctoras de problemas de visión). La potencia de las lentes y de los prismas depende de su índice de refracción; las lentes de gran potencia tiene índices de refracción altos.

La refracción se produce en cualquier tipo de onda, no sólo en las lumínicas. Las olas del mar se hacen más lentas a medida que la profundidad del agua disminuya, imitando un cambio en el índice de refracción. Debido a esto, las olas del mar que se mueven formando un ángulo hasta una playa poco profunda se curvan hacia ésta a medida que se aproximan de tal modo que siempre rompe paralelo al final de la playa.

Vaya revuelo

Las piscinas son uno de los temas favoritos del artista británico David Hockney. Además de divertirse pintando los efectos ópticos de los cuerpos deslizándose bajo el agua, bañados por el espléndido sol de su casa de California, en 2001 Hockney provocó un revuelo en el arte al sugerir que algunos artistas famosos utilizaban lentes para crear sus obras ya desde el siglo XV. Ciertos artilugios ópticos simples proyectaban una escena en el lienzo para que el artista trazara su contorno y la pintara. Hockney ha descubierto sugestivas formas geométricas al contemplar a los viejos maestros, incluyendo a Ingres y Caravaggio.

Reflexión interna total

A veces, si un rayo de luz que viaja por un cristal alcanza el límite con el aire formando un ángulo demasiado plano, el rayo se refleja hacia atrás desde el punto de contacto en lugar de continuar desplazándose por el aire. Esto se denomina reflexión interna total porque toda la luz permanece en el cristal. El ángulo crítico en el cual ocurre esto también está determinado por los índices de refracción relativos de ambos materiales. Esto sólo ocurre para las ondas que viajan de un material de índice de refracción alto a otro de índice de refracción bajo, por ejemplo, del cristal al aire.

El principio de Fermat del mínimo tiempo

La ley de Snell es una consecuencia del principio de Fermat del tiempo mínimo, que afirma que los rayos de luz toman siempre el camino más rápido para atravesar cualquier sustancia. Así, para escoger el camino a seguir en un amasijo de materiales de índices de refracción diferentes, el rayo de luz escogerá la ruta más rápida favoreciendo al material con un bajo índice de refracción. Esto es básicamente una forma de definir qué es un haz de luz y se puede deducir del principio de Huygens señalando que los rayos que viajan por el camino más rápido tenderán a reforzarse unos a otros y a crear un haz, mientras que la luz que viaja en diferentes direcciones aleatorias por término medio se anulará. El matemático Pierre Fermat propuso este principio en el siglo XVII, cuando el estudio de la óptica estaba en su apogeo.

Metamateriales

Hoy en día, los físicos están diseñando una nueva clase de materiales especiales, llamados metamateriales, que se comportan de formas nuevas cuando son iluminados por la luz u otras ondas electromagnéticas. Los metamateriales se desarrollan de forma que su apariencia frente a la luz venga dictada por su estructura física y no por la química. Un ópalo es un metamaterial que se encuentra en la naturaleza: su estructura cristalina afecta a la forma en que la luz refleja y refracta desde su superficie para producir destellos de diferentes colores.

PIERRE FERMAT (1601-1665)

Uno de los mayores matemáticos de su época, Pierre Fermat era un abogado de Toulouse que se dedicaba a las matemáticas en su tiempo libre. Tras escribir a famosos matemáticos parisinos, la reputación de Fermat creció, pero tuvo que luchar para conseguir que publicaran sus trabajos. Discrepó de René Descartes en cuanto a la teoría de la refracción, describiéndola como «un andar a tientas por las sombras». Descartes estaba muy enfadado, pero Fermat estaba en lo cierto. Más tarde, Fermat cristalizó su trabajo en el teorema del tiempo mínimo, la idea de que la luz sigue el camino más corto. El trabajo de Fermat quedó interrumpido por la guerra civil en Francia y el estallido de la peste. Pese a los falsos rumores de que había sucumbido a la peste, continuó trabajando en la teoría de los números. Como más se le recuerda es por el último teorema de Fermat, que afirma que la suma de dos cubos no puede ser un cubo (y así sucesivamente para potencias mayores). Fermat escribió en el margen de un libro «he descubierto una prueba verdaderamente notable [de este teorema] que no cabe en este margen». La prueba perdida de Fermat desconcertó a los matemáticos durante tres siglos antes de que el matemático británico Andrew Wiles finalmente la demostrara en 1994.

A finales de los años noventa se diseñaron metamateriales con índices de refracción negativos, en los cuales la luz se curva en dirección opuesta al punto de contacto. Si un amigo estuviera en un charco de líquido con índice de refracción negativo pueden ser utilizados para la fabricación de «superlentes», que forman imágenes mucho más claras de lo que es posible con las mejores lentes. Y en 2006, los físicos lograron fabricar un metamaterial «dispositivo de ocultación» que resulta completamente invisible a las microondas.

Cronología

984 d. C. Ibn Sahl escribe sobre la refracción y las lentes.

1621 d. C.	Snellius diseña su ley de la refracción.
1637 d. C.	Descartes publica una ley similar.
1703 d. C.	Huygens publica la ley de Snell.
1990 d. C.	Se desarrollan los metamateriales.

La idea en síntesis: la luz encuentra el camino más corto

17. Ley de Bragg

La estructura de doble hélice del ADN fue descubierta utilizando la ley de Bragg. Explica cómo las ondas que se desplazan a través de un sólido ordenado se refuerzan unas a otras para producir un patrón de puntos brillantes cuya distancia intermedia depende de las distancias regulares entre los átomos o moléculas en el sólido. Al medir el patrón emergente de puntos se puede deducir la arquitectura del material cristalino.

Si está sentado en una habitación iluminada, ponga la mano cerca de la pared y observará tras ella una silueta bien definida. Separe la mano un poco más de la pared y el contorno de la sombra se irá haciendo borroso. Esto es debido a la difracción de la luz alrededor de su mano. Los rayos de luz se difunden hacia dentro alrededor de sus dedos cuando pasan, difuminando su contorno. Todas las ondas se comportan así. Las ondas marinas se difractan alrededor de los bordes de los muros del puerto y las ondas sonoras se curvan hacia fuera más allá del borde del escenario en un concierto.

La difracción se puede describir utilizando el principio de Huygens, que permite predecir el paso de una onda teniendo en cuenta que cada punto de un frente de onda es una fuente de nuevas energías de ondas. Cada punto produce una onda circular y estas ondas se suman para describir cómo avanza la onda hacia delante. Si el frente de onda es limitado, las ondas circulares de los extremos finales se difundirán sin obstáculos. Esto sucede cuando una serie de ondas paralelas sortean un obstáculo, como su mano, o pasan por una abertura, como la entrada del puerto o el umbral de una puerta.

Cristalografía de los rayos X

El físico australiano William Lawrence Bragg descubrió que la difracción siempre se produce en las ondas que viajan a través de un cristal. Un cristal está compuesto por numerosos átomos que forman una estructura parecida a una rejilla con filas y columnas regulares. Cuando Bragg proyectó rayos X a través de un cristal en una

pantalla, los rayos dispersaron las filas de átomos. Los rayos salientes se amontonaban más en unas direcciones que en otras, formando gradualmente patrones de puntos. Dependiendo del tipo de cristal utilizado aparecían patrones de puntos diferentes.

WILLIAM LAWRENCE BRAGG (1890-1971)

William Lawrence Bragg nació en Adelaida, donde su padre William Henry era profesor de matemáticas y física. El joven Bragg se convirtió en el primer australiano al que miraron por rayos X cuando se cayó de la bicicleta y se rompió el brazo. Estudió ciencias físicas y después de graduarse siguió a su padre hasta Inglaterra. En Cambridge, Bragg descubrió su ley sobre la difracción de los rayos X por medio de cristales. Discutió sus ideas con su padre, pero le preocupaba que muchos pensaran que el descubrimiento había sido de su padre y no suyo. Durante la primera y la segunda guerra mundial, Bragg se unió al ejército y trabajó en el sonar. Después, regresó a Cambridge donde había fundado varios pequeños grupos de investigación. En su trayectoria posterior, Bragg se convirtió en un eficaz comunicador científico, iniciando una serie de conferencias para escolares en la Royal Institution de Londres y realizó apariciones regulares en televisión.

Los rayos X, descubiertos por el físico alemán Wilhelm Röntgen en 1895, eran necesarios para observar este efecto porque su longitud de onda es diminuta, un millar de veces menor que la longitud de onda de la luz visible y más pequeña que los átomos espaciados en el cristal. Por lo tanto, la longitud de onda de los rayos X es lo bastante pequeña para que lo atraviesen y para ser fuertemente difractados por las capas del cristal.

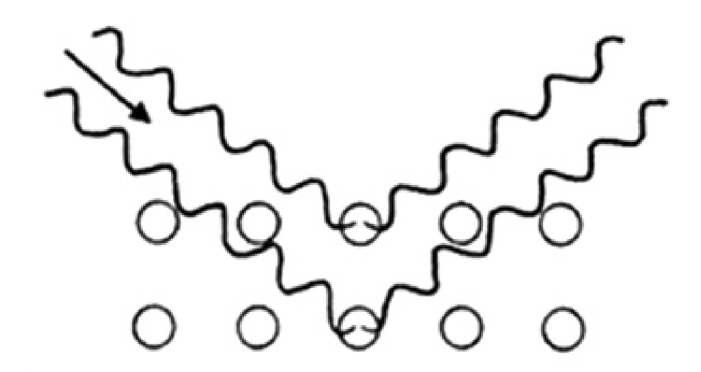
Los puntos más brillantes de los rayos X se generan cuando al atravesar el cristal los rayos siguen trayectorias que producen señales que están «en fase». En las ondas en fase, donde las crestas y los valles están alineados, se unen para reforzar su brillo y producir puntos. Cuando están desfasadas, con las crestas y los valles

desalineados, se anulan y no se produce ninguna luz.

«Lo importante de la ciencia no es tanto obtener nuevos hechos como descubrir nuevos modos de pensar sobre ellos.» Sir William Bragg, 1968

Así que usted ve un patrón de puntos brillantes cuyo espaciado le indicará la distancia entre las filas de los átomos del cristal. Este efecto de refuerzo y anulación de las ondas se denomina «interferencia».

Bragg expresó esto matemáticamente considerando dos ondas, una que se reflejaba en la superficie del cristal y la otra que penetraba una única capa de átomos del cristal. Para que la segunda onda estuviera en fase y reforzara a la primera tenía que viajar una distancia adicional equivalente a un número entero con una longitud de onda mayor que la de la primera onda.



Esta distancia adicional depende del ángulo con el cual incida el rayo y de la separación entre las capas de átomos. La ley de Bragg establece que la interferencia observada y el espacio del cristal están relacionados para una longitud de onda determinada.

Estructura profunda

La cristalografía de los rayos X es de gran utilidad para determinar la estructura de los nuevos materiales, y para los químicos y biólogos que investigan la arquitectura de las moléculas. En 1953 se utilizó para identificar la estructura de doble hélice del ADN; Francis Crick y James Watson extrajeron su archiconocida idea de los patrones de interferencia de los rayos X de Rosalind Franklin para el ADN y se

dieron cuenta de que las moléculas que los producían tienen que estar dispuestas en forma de doble hélice.

La doble hélice del ADN

En los años cincuenta, los investigadores estaban desconcertados ante la estructura del ADN, uno de los bloques constituyentes de la vida. Los físicos británicos James Watson y Francis Crick publicaron su estructura de la doble hélice en 1953, lo cual fue un decisivo paso adelante. Reconocieron haberse inspirado en los investigadores del King's College de Londres, Maurice Wilkins y Rosalind Franklin, que habían tomado fotografías cristalográficas del ADN con rayos X utilizando la ley de Bragg. Franklin realizó exquisitas fotografías que mostraban la variedad de interferencias de puntos brillantes que revelaban en último término la estructura del ADN. Crick, Watson y Wilkins recibieron el Premio Nobel por su trabajo, pero Franklin no pudo asistir a causa de su prematura muerte. Algunos también piensan que se quitó importancia a su papel en el descubrimiento debido a las actitudes sexistas de aquella época. Quizá también los resultados de Franklin trascendieron a Watson y Crick sin el consentimiento de ella. Desde entonces, se reconoce su contribución.

WILHELM RÖNTGEN (1845-1923)

Wilhelm Röntgen nació en el Bajo Rin, en Alemania, aunque se trasladó a Holanda siendo aún niño. Estudió física en Utrecht y Zurich, y trabajó en numerosas universidades antes de desempeñar sus principales tareas docentes en las universidades de Wurzburgo y Munich. El trabajo de Röntgen se centró en el calor y el electromagnetismo, pero se le conoce sobre todo por su descubrimiento de los rayos X en 1895. Al hacer pasar electricidad a través de un gas a baja presión, observó que una pantalla recubierta de una sustancia química emitía una fluorescencia incluso

cuando realizaba el experimento a oscuras. Estos nuevos rayos atravesaban diferentes materiales, incluyendo los tejidos de la mano de su esposa, colocada frente a una placa fotográfica. Los denominó rayos X porque su origen era desconocido. Más adelante se comprobó que se trataba de ondas electromagnéticas similares a la luz, salvo por su más elevada frecuencia.

La ley de Bragg se expresa matemáticamente como

$$2\ d \sin \theta = n\ \lambda$$

donde d es la distancia entre la capa de átomos,
θ es el ángulo de incidencia de la luz,
n es un número entero y
λ es la longitud de onda de la luz.

Por primera vez el descubrimiento de los rayos X y las técnicas cristalográficas proporcionaron a los físicos herramientas para analizar la estructura profunda de la materia e incluso del cuerpo. Muchas técnicas utilizadas actualmente para la toma de imágenes médicas se basan en conceptos físicos similares. La tomografía axial computarizada reúne muchas secciones de rayos X del cuerpo para ofrecer una visión interna real; los mapas de ultrasonidos de alta frecuencia obtienen ecos de los órganos corporales; la imagen por resonancia magnética (MRI) escanea el agua a través de los tejidos corporales para identificar vibraciones moleculares generadas por medio de potentes imanes; y la tomografía por emisión de positrones (PET) sigue los rastros radioactivos mientras circulan por el organismo. Así, tanto doctores como pacientes están agradecidos a los físicos como Bragg por desarrollar estas herramientas.

Cronología:

1895 d. C.	Röntgen descubre los rayos X.
1912 d. C.	Bragg descubre su ley sobre la difracción.
1953 d. C.	La difracción de los rayos X se utiliza para descubrir la estructura del ADN.

La idea en síntesis: estructura de puntos

18. La difracción de Fraunhofer

¿Por qué nunca podemos obtener una imagen perfecta con la cámara? ¿Por qué es imperfecta nuestra propia visión ocular? Incluso el punto más diminuto se vuelve borroso porque la luz se difumina al pasar por el ojo o por la abertura de la cámara. La difracción de Fraunhofer describe este enturbiamiento de los rayos de luz que nos llegan desde un campo distante.

Cuando miramos un barco que navega en lontananza es imposible leer su nombre. Se pueden utilizar unos prismáticos para ampliar la imagen, pero ¿por qué tienen nuestros ojos esa resolución limitada? La razón es el tamaño de la pupila de nuestros ojos (su abertura). Tienen que estar completamente abiertos para permitir que entre luz suficiente para disparar los sensores de los ojos, pero cuanto más abiertos están más se difuminan las ondas de luz entrantes.

Las ondas lumínicas que atraviesan la lente y alcanzan el ojo pueden proceder de numerosas direcciones. Cuanto mayor sea la abertura, los rayos entrarán desde más puntos. Igual que con la difracción de Bragg, las diferentes trayectorias de la luz interfieren dependiendo de si están en fase o desfasadas. La mayoría pasan directamente en fase formando así un punto central claro y brillantes. Pero el ancho del punto se reduce al instante cuando los rayos adyacentes se anulan mutuamente y entonces aparecen una serie de bandas de luz y oscuridad en los bordes. Es el ancho de este punto central el que determina todos los detalles que nuestros ojos son capaces de captar.

El campo lejano

La difracción de Fraunhofer, llamada así por el mayor fabricante de lentes alemán, Joseph von Fraunhofer, describe las imágenes borrosas que se ven cuando los rayos de luz que inciden en la abertura de una lente llegan a ésta paralelos entre sí. La difracción de Fraunhofer, también llamada difracción del campo lejano, tiene lugar cuando hacemos pasar luz desde una fuente distante (p. ej. la luz del Sol o de las estrellas) a través de una lente. Esta lente puede estar en nuestros ojos, en una

cámara o en un telescopio. En cuanto a las limitaciones de la vista, en toda la fotografía, los efectos de la difracción difuminan la imagen final. Por consiguiente, existe un límite natural a lo nítida que puede ser una imagen una vez que ha viajado a través de un sistema óptico: el «límite de difracción». Este límite es directamente proporcional al tamaño de la abertura o lente. Así pues, las imágenes azules aparecen ligeramente más claras que las rojas, y las imágenes tomadas con una abertura o lente mayor serán menos borrosas.

Difracción

Del mismo modo que los bordes de la sombra de su mano se vuelven borrosos debido a la difracción de la luz alrededor de ella, la luz se difunde cuando pasa a través de un agujero estrecho o una abertura. Contra lo que podría parecer, cuanto más estrecha es la abertura más luz se despliega. Al proyectarla en una pantalla, la luz que sale de la abertura produce un brillante pico central flanqueado por bandas alternas de luz y oscuridad o patrones de interferencia, cuyo brillo decae al alejarse del centro. La mayoría de los rayos lo atraviesan en línea recta y se refuerzan, pero los que penetran formando un ángulo interfieren para producir bandas oscuras o iluminadas.

Cuanto más pequeño es el agujero, mayor es la separación entre las bandas, porque las trayectorias de los rayos están más restringidas y por tanto son más similares. Si sostiene frente a la luz dos trozos de alguna gasa fina, por ejemplo, dos pañuelos de seda, y los mueve uno respecto a otro, se producirán bandas claras y oscuras similares desde los hilos superpuestos. Cuando se colocan uno sobre otro y se giran, nuestro ojo capta una serie de zonas claras y oscuras que se mueven por la tela. Estos patrones de interferencia de dos rejillas superpuestas también se conocen como «patrones de moiré».

Cuando la abertura o lente es circular, como en el caso de nuestras pupilas y muchas veces de la óptica de una cámara, el punto central y las bandas que lo rodean forman una serie de círculos concéntricos que se conocen como anillos o disco de Airy por el físico escocés del siglo XIX George Airy.

Campo cercano

La difracción de Fraunhofer se observa en numerosas ocasiones, pero si la fuente de luz se encuentra cerca del plano de abertura a veces surge un patrón ligeramente diferente.



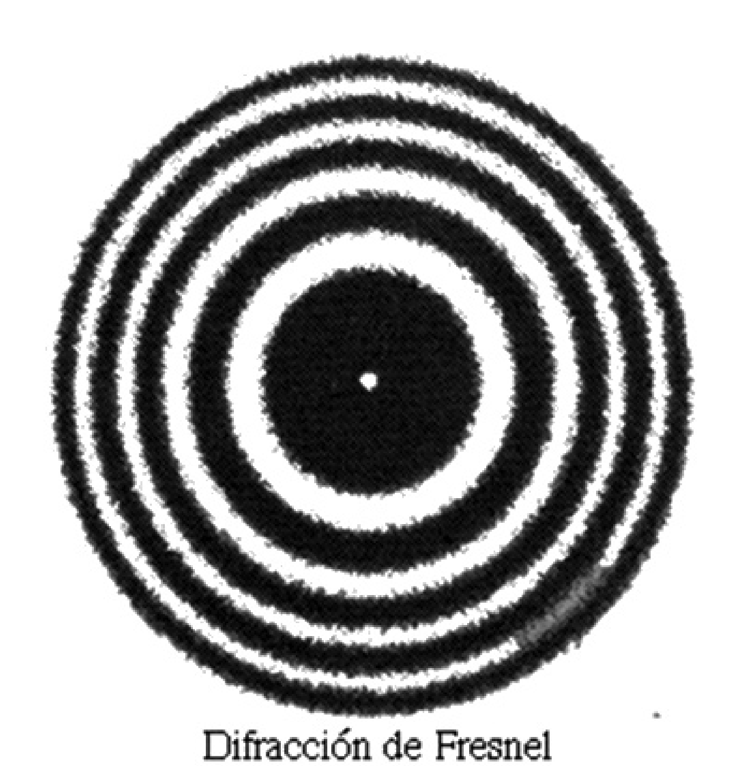
Difraccion de Fraunhofer

Los rayos de luz incidentes no son paralelos y los frentes de onda que llegan a la abertura son curvos en lugar de rectos. En este caso resulta un patrón de difracción diferente, en el que las bandas ya no presentan un espacio regular. Las series de frentes de onda que llegan adoptan la forma de un conjunto de superficies concéntricas curvas, que recuerdan las capas de una cebolla, todas del mismo ancho de longitud de onda y con la fuente de luz en el centro. Cuando estos frentes de onda redondos alcanzan el plano de abertura, se cortan transversalmente igual que cuando el cuchillo corta una cebolla por la mitad. A través de la abertura aparecen una serie de anillos, donde cada uno de ellos representa una zona en la que las ondas que la atraviesan se encuentran en una misma longitud de onda.

Para calcular cómo se combinan esos rayos curvos entre sí, hay que sumar todos los rayos a partir de los anillos de la abertura. En una pantalla plana presentan una serie de bandas claras y oscuras, como en los rayos paralelos, pero las separaciones ya no son regulares, sino que cuanto más nos alejamos del centro más delgadas son. Esto se denomina difracción de Fresnel por Augustin Fresnel, el

científico francés del siglo XIX que lo estableció.

Fresnel también descubrió que al variar la abertura se podía alterar la fase que la atravesaba y de esta manera cambiar el patrón resultante. Utilizó esta idea para construir un nuevo tipo de lente que sólo permitía atravesar a las ondas en fase. Una manera de hacerlo era, por ejemplo, eliminar una serie de anillos que tuvieran exactamente la misma posición que todos los valles negativos de las ondas cuando pasaban por la abertura, de modo que sólo los picos positivos pudieran pasar, sin producirse apenas ninguna interferencia.



Difracción de Fresnel

Alternativamente, se podrían desplazar los valles media longitud de onda y transmitirlos después para que volvieran a estar en fase con las ondas no bloqueadas. Al insertar anillos de cristal más grueso en la posición adecuada se puede disminuir la velocidad de la luz en una fase particular en la cantidad deseada para desplazar las longitudes de onda.

El propio Fresnel desarrolló lentes para los faros utilizando este concepto, y el primero se instaló en Francia en 1822. Imaginemos que se aumentan las lentes de cristal de un par de gafas al tamaño necesario para un faro de 15 metros. La

alternativa de Fresnel fue una serie de anillos de cristal grandes aunque bastante delgados, cada uno de una fracción del peso de una sola lente convexa. Las lentes de Fresnel se utilizan para enfocar los faros de los coches y a veces se adhieren a la ventana trasera de los automóviles, en forma de unos paneles de plástico transparente grabados, para ayudar a dar marcha atrás.

El experimento de la doble rendija de Young

En su celebrado experimento de 1801, Thomas Young demostró de forma concluyente que la luz era una onda. Cuando difractó la luz a través de dos rendijas, no sólo observó una superposición de dos perfiles de difracción, sino líneas adicionales, debido a la interferencia de los rayos de luz que habían pasado a través de una u otra de las rendijas. Los rayos u otra de las rendijas. Los rayos volvían a interferir de nuevo para producir bandas claras y oscuras, pero con una separación que era inversamente proporcional a la distancia entre las rendijas. De modo que surgió un patrón común de bandas finas frente al patrón de difracción ancho original de una sola abertura. Cuantas más rendijas paralelas se añadían, más agudo se volvía este segundo patrón de interferencia.

Redes

Fraunhofer amplió su estudio de las interferencias construyendo la primera red de difracción. Una red está provista de una serie de aberturas, como muchas filas de rendijas paralelas. Fraunhofer construyó la suya con alambres alineados. Las redes de difracción no sólo dispersan la luz, pues al tener numerosas rendijas, aumentan las interferencias características de la luz transmitida.

Como la luz se difracta y causa interferencias, se comporta en todos estos casos como una onda. Pero esto no siempre es así. Einstein y otros demostraron que a veces, si miramos en la dirección adecuada, la luz no sólo se comporta como una onda, sino también como una partícula. La mecánica cuántica surgió a partir de esta observación. Como veremos más adelante, sorprendentemente, en las versiones cuánticas del experimento de la doble rendija, la luz sabe si se tiene que

comportar como una onda o como una partícula y cambia de carácter sólo porque estamos observando.

Cronología:

1801 d. C.	Thomas Young realiza su experimento de la doble rendija.
1814 d. C.	Fraunhofer inventa el espectroscopio.
1822 d. C.	La primera lente de Fresnel se utiliza en un faro.

La idea en síntesis: las ondas lumínicas de interferencia

19. El efecto Doppler

Todos hemos oído cómo disminuye el tono de la sirena de una ambulancia al pasar por nuestro lado. Las ondas que nos llegan desde una fuente que se aproxima hacia nosotros, nos llegan comprimidas de tal modo que su frecuencia parece mayor. Del mismo modo, las ondas se dispersan y por ello tardan más en llegar hasta nosotros desde una fuente que se aleja y el resultado es un descenso en la frecuencia. Éste es el efecto Doppler. Ha sido utilizado para medir la velocidad de los coches, el flujo sanguíneo y los movimientos de las estrellas de las galaxias en el universo.

Cuando una ambulancia se aproxima hacia nosotros en la calle, la sirena cambia de tono, alto cuando se acerca y bajo cuando se aleja.



Este cambio en el tono se debe al efecto Doppler, propuesto por el matemático y astrónomo austríaco Christian Doppler en 1842. Se produce a causa del movimiento del vehículo emisor en relación con nosotros, los observadores. Mientras el vehículo se aproxima, las ondas sonoras se suman, la distancia entre cada frente de onda se comprime y el sonido nos llega más alto. Cuando se aleja, los frentes de onda tardan lógicamente un poco más en legarnos, los intervalos se hacen más largos y el tono desciende. Las ondas sonoras son pulsos de aire comprimido.

CHRISTINA DOPPLER (1803-1853)

Christian Doppler nació en el seno de una familia de albañiles de

Salzburgo, Austria. Era demasiado frágil para continuar con el negocio familiar, por lo que fue a la Universidad de Viena para estudiar matemáticas, filosofía y astronomía. Antes de encontrar un trabajo como profesor universitario en Praga, Doppler tuvo que trabajar como contable e incluso pensó en emigrar a América. Aunque ascendió a profesor, Doppler sufrió con su carga docente y su salud se resintió. Uno de sus amigos escribió: «Cuesta creer que Austria cuente con un genio tan fructífero, he escrito a muchas … personas que pueden salvar a Doppler para la ciencia y no dejarle morir bajo el yugo. Por desgracia, temo lo peor». Finalmente, Doppler abandonó Praga y regresó a Viena. En 1842, presentó un artículo donde describía el desplazamiento del color en la luz estelar, lo que actualmente denominamos efecto Doppler. «Se puede aceptar casi con total certeza que en un futuro no muy lejano ofrecerá a los astrónomos un medio válido para determinar el movimiento y la distancia de estas estrellas que, debido a sus inconmensurables distancias de nosotros y a la consiguiente pequeñez de los ángulos paralácticos, hasta el momento apenas sí existía alguna esperanza de conseguir.» Aunque se le consideraba imaginativo, fue objeto de una acogida desigual por parte de otros científicos notables. Los detractores de Doppler cuestionaban su capacidad matemática, mientras que sus amigos tenían un elevado concepto de su creatividad e intuición científica.

De un lado a otro

Imaginemos que alguien le lanzara pelotas de forma continua desde una plataforma móvil, por ejemplo, un tren, a una frecuencia de una bola cada tres segundos, de acuerdo con su reloj de pulsera. Si el tren avanza hacia usted la bola tardará poco menos de tres segundos en alcanzarle puesto que cada vez son lanzadas desde un poco más cerca. Por lo tanto, al receptor le parecerá más rápido el ritmo. Del mismo modo, si la plataforma se aleja, las bolas tardarán un poco más en llegar, recorriendo una pequeña distancia adicional, así que su frecuencia de llegada es

menor. Si pudiera medir ese cambio de cadencia con su propio reloj entonces podría calcular la velocidad del tren donde se encuentra el lanzador. El efecto Doppler se aplica a cualquier objeto que se mueva en relación con otro. Lo mismo sucedería si fuera usted el que se moviera en un tren y el lanzador de pelotas se encontrara en una plataforma inmóvil. Como forma de medir la velocidad, el efecto Doppler tiene numerosas aplicaciones. En medicina se utiliza para medir el flujo sanguíneo y también en los radares de las carreteras que detectan a los conductores que corren demasiado.

«Quizá cuando la gente en la distancia de otros planetas perciba alguna de nuestras longitudes de onda, lo único que oirán será un grito continuo.» Iris Murdoch, 1919-1999

El movimiento en el espacio

El efecto Doppler también aparece frecuentemente en astronomía, siempre que hay materia en movimiento. Por ejemplo, la luz que procede de un planeta que gira alrededor de una estrella lejana mostrará cambios Doppler. A medida que el planeta se mueve hacia nosotros la frecuencia aumenta y cuando gira alejándose su frecuencia lumínica disminuye. Se dice que la luz del planeta que se aproxima se «desvía hacia el azul»; cuando se aleja «se desvía hacia el rojo». Desde los años noventa, se han detectado cientos de planetas alrededor de estrellas lejanas al descubrir este patrón en el brillo de la estrella central.

Los desplazamientos hacia el rojo pueden producirse no sólo debido a los movimientos orbitales de los planetas, sino también a la expansión del propio universo, cuando se denomina desplazamiento cosmológico hacia el rojo. Si el espacio intermedio entre nosotros y una galaxia distante aumenta firmemente a medida que el universo se expande, esto es equivalente a que la galaxia se aleja de nosotros a cierta velocidad. Del mismo modo, dos puntos en un globo que se está inflando parece que se separen.

Planetas extrasolares

Se han descubierto más de 200 planetas que giran alrededor de estrellas diferentes del Sol. La mayoría son gigantes gaseosos

parecidos a Júpiter, pero con órbitas mucho más cercanas a su estrella central. Pero se han descubierto unos cuantos planetas posiblemente rocosos, de tamaño parecido a la Tierra. Aproximadamente una de cada diez estrellas tienen planetas y esto ha alimentado la especulación de que algunos pueden incluso albergar formas de vida. La gran mayoría de los planetas se han descubierto observando la acción gravitatoria del planeta sobre su estrella anfitriona. Los planetas son diminutos comparados con las estrellas alrededor de las que giran, así que cuesta verlos contra el brillo de la estrella. Pero la masa de un planeta produce una pequeña oscilación en la estrella y este tembleque o se percibe como un cambio Doppler en la frecuencia de un rasgo característico en el espectro estelar. Los primeros planetas extrasolares fueron detectados alrededor de un pulsar en 1992 y alrededor de una estrella normal en 1995. Actualmente su detección es rutinaria, pero los astrónomos todavía buscan sistemas solares parecidos a la Tierra y tratan de dilucidar cómo se producen las diferentes configuraciones planetarias. Se espera que los nuevos observatorios espaciales, como el telescopio europeo COROT de 2006 y el Kepler de la Nasa (en 2008) identifiquen muchos planetas parecidos a la Tierra en un futuro próximo.

Por consiguiente, la luz de la galaxia se desplaza a frecuencias más bajas porque las ondas tienen que desplazarse cada vez más lejos para llegar hasta nosotros. Por ello, las galaxias muy distantes nos parecen más rojas que las cercanas. Hablando en sentido estricto, el desplazamiento cosmológico hacia el rojo no es un verdadero efecto Doppler porque la galaxia que se aleja no se mueve realmente en relación con los objetos cercanos. La galaxia está fija en su entorno y es el espacio intermedio el que en realidad se estira.

En honor a él, el propio Doppler observó que el efecto Doppler podía resultar de utilidad para los astrónomos, pero aun así no podía imaginar la gran repercusión que tendría. Afirmó haber visto este efecto reflejado en los colores de la luz de

estrellas emparejadas, pero esto fue discutido en su día. Doppler fue un científico imaginativo y creativo pero a veces su entusiasmo sobrepasaba sus habilidades experimentales. Sin embargo, varias décadas más tarde, los desplazamientos hacia el rojo fueron medidos en las galaxias por el astrónomo Vesto Slipher, preparando el escenario para el desarrollo del modelo del universo del big bang. Y en la actualidad, el efecto Doppler ayuda a identificar universos alrededor de estrellas distantes que incluso podrían albergar vida.

Cronología

1842 d. C.	Doppler presenta su artículo sobre el cambio de color en la luz estelar.
1912 d. C.	Vesto Slipher mide el desplazamiento hacia el rojo de las galaxias.
1992 d. C.	Se produce la primera detección de un planeta extrasolar mediante el método Doppler.

La idea en síntesis: el tono perfecto

20. La ley de Ohm

¿Por qué está usted a salvo cuando vuela en medio de una tormenta eléctrica? ¿Cómo protegen los pararrayos a los edificios? ¿Por qué no se debilita la luz de las bombillas de su hogar cada vez que usted enciende otra? La ley de Ohm tiene las respuestas.

La electricidad se produce del movimiento de las cargas eléctricas. La carga eléctrica es una propiedad básica de las partículas subatómicas que determina el modo en que interactúan con los campos electromagnéticos. Estos campos crean fuerzas que mueven las partículas con carga eléctrica. La carga, igual que la energía, se conserva globalmente; no se puede crear ni destruir, pero muchas se pueden mover de un lado a otro.

La carga puede ser una propiedad positiva o negativa. Las partículas de carga opuesta se atraen; las de carga igual se repelen. Los electrones tienen una carga negativa (que fue medida por Robert Millikan en 1909) y los protones una carga positiva. Los neutrones, como su nombre indica, no tienen carga y, por tanto, son «neutros».

Electricidad estática

La electricidad puede permanecer estática, como una distribución fija de cargas, o circular, como una corriente eléctrica. La electricidad estática se forma cuando las partículas cargadas se mueven, de forma que las cargas opuestas se acumulan en diferentes puntos. Por ejemplo, si frota un peine de plástico en la manga, éste se carga y puede atraer pequeños objetos con carga opuesta, como trocitos de papel.

Los relámpagos se forman de modo similar: la fricción entre moléculas en las turbulentas nubes de una tormenta generan electricidad que se descarga repentinamente en forma de rayo. El estallido de los relámpagos puede alcanzar varios kilómetros de longitud y decena de miles de grados Celsius de temperatura.

BENJAMIN FRANKLIN (1706-1790)

Benjamin Franklin nació en Boston, EE. UU., el decimoquinto hijo y

el más joven de un vendedor de velas. Aunque recibió presiones para convertirse en clérigo, Ben acabó trabajando en una imprenta. Incluso después de haber alcanzado la fama, firmaba modestamente sus cartas como «B. Franklin, impresor». Franklin publicó Poor Richard's Almanac, el cual le lanzó a la fama gracias a citas memorables como «El pescado y los visitantes apestan durante tres días». Franklin fue un inventor prodigioso —desarrolló el pararrayos, la armónica de cristal, las lentes bifocales y muchas otras cosas—, pero sobre todo se sentía fascinado por la electricidad. En 1752 llevó a cabo su experimento más famoso, extrayendo chispas eléctricas de una nube tormentosa mediante una cometa en medio de una tormenta. Franklin contribuyó a la vida pública en su país, en los últimos años de su vida, introduciendo las bibliotecas públicas, los hospitales y los bomberos voluntarios y trabajó para abolir la esclavitud. Se convirtió en político, conduciendo misiones diplomáticas entre Estados Unidos, Gran Bretaña y Francia durante y después de la revolución americana. Fue miembro del Comité de los Cinco, que realizó el borrador de la Declaración de la Independencia en 1776.

En marcha

La corriente eléctrica es un flujo de cargas. Los cables metálicos conducen la electricidad porque los electrones en los metales no están unidos a ningún núcleo atómico en particular y pueden movilizarse con gran facilidad. Se dice que los metales son conductores de la electricidad. Los electrones se mueven por el cable de metal igual que el agua por una tubería. En otros materiales, son las cargas positivas las que se mueven. Cuando las sustancias químicas se disuelven en agua tanto los electrones como los núcleos cargados positivamente (iones) flotan libremente. Los materiales conductores permiten que las cargas se muevan con mayor facilidad a través de ellos. Los materiales que no permiten pasar la electricidad, como la cerámica o los plásticos, se denominan aislantes. Los que conducen la electricidad únicamente en ciertas circunstancias se denominan

semiconductores.

Como ocurre con la gravedad, una corriente eléctrica se puede crear mediante un gradiente, en este caso en un campo eléctrico o un potencial eléctrico. Por lo tanto, igual que una carga en desnivel (potencial gravitatorio) hace que un río descienda por una colina, un cambio en el potencial eléctrico entre dos extremos de un material conductor hace que una corriente de carga fluya a través de él. Esta «diferencia de potencial» o voltaje dirige el flujo de la corriente y también da energía a las cargas.



En 1752, Benjamin Franklin logró «extraer» electricidad de una nube tormentosa con la ayuda de una cometa en Filadelfia.

Resistencia

Cuando cae un rayo, la descarga eléctrica circula con gran rapidez a través del aire ionizado hasta el suelo. Al hacerlo anula la diferencia de potencial que lo dirige, de modo que la caída de un rayo conlleva una enorme corriente. Lo que puede matarle al pasar por su cuerpo es la enorme corriente, y no el voltaje. En la práctica, las cargas no pueden moverse a velocidad tan vertiginosa a través de la mayoría de los materiales porque encuentran resistencia. La resistencia limita la magnitud de la corriente disipando la energía eléctrica en forma de calor. Para evitar que le matara un rayo tendría que colocarse de pie sobre un aislante, quizá una esterilla de goma, que tiene una alta resistencia. O podría esconderse en una jaula de metal, ya que el relámpago puede circular con mucha más facilidad por los barrotes de metal que por su cuerpo, el cual, por ser en su mayor parte agua, no es un buen conductor. Esta construcción se conoce como la jaula de Faraday, en honor a Michael Faraday, que construyó una en 1836. El patrón del campo eléctrico establecido por la jaula de Faraday —un conductor hueco— significa que toda la carga se transmite por la parte exterior de la jaula, mientras que el interior es completamente neutro. Las jaulas de Faraday fueron dispositivos de seguridad muy útiles para los científicos del siglo XIX que ejecutaban demostraciones de relámpagos artificiales. Actualmente todavía sirven para proteger equipos electrónicos y explican por qué

cuando viaja en mitad de una tormenta eléctrica dentro de un avión metálico está a salvo.

Los relámpagos

Quizá no caerán en el mismo sitio dos veces, pero, por término medio, cae un relámpago en la superficie de la Tierra cien veces por segundo u 8,6 millones de veces al día. Sólo en los Estados Unidos cae la asombrosa cifra de 20 millones de rayos por año por cada 100.000 tormentas eléctricas.

El pararrayos de Benjamín Franklin funciona de una forma similar, proporcionando una trayectoria de baja resistencia para que la corriente del relámpago la siga en lugar de liberar su energía en el edificio donde cae, que opone una alta resistencia. Los pararrayos de punta afilada son los que mejor funcionan porque concentran el campo eléctrico en la punta, aumentando la probabilidad de que la electricidad sea canalizada por esta vía hasta el suelo.

Circuitos

Los flujos eléctricos siguen bucles llamados circuitos. El movimiento de la corriente y la energía a través de los circuitos se puede describir del mismo modo que el agua que fluye a través de una serie de tuberías. La corriente es similar a la velocidad del flujo, el voltaje a la presión del agua y la resistencia al ancho de la tubería o a las limitaciones que se hayan impuesto en su interior.

En 1826, George Ohm publicó una de las leyes más útiles para interpretar circuitos eléctricos. La ley de Ohm se escribe algebraicamente como $V = IR$, lo que significa que un descenso en el voltaje (V) es igual al producto de la corriente (I) por la resistencia (R). Según la ley de Ohm, el voltaje es proporcional a la corriente y a la resistencia. Si duplicamos el voltaje en un circuito, también doblamos la corriente que fluye por su interior si la resistencia es la misma: para mantener la misma corriente necesitamos una resistencia dos veces mayor. La corriente y la resistencia son inversamente proporcionales, así que si aumentamos la resistencia disminuimos la corriente. La ley de Ohm se aplica incluso a circuitos complejos con

numerosos bucles. El circuito más simple que se puede imaginar es una bombilla de luz conectada a una batería por medio de un cable. La batería suministra la diferencia de potencial necesaria para conducir la corriente a través del cable y el filamento de tungsteno de la bombilla opone cierta resistencia mientras convierte la energía eléctrica en luz y calor. ¿Qué sucedería si introdujéramos otra bombilla en el circuito? De acuerdo con la ley de Ohm, si estas dos bombillas se colocaran una junto a otra se habría doblado la resistencia y por tanto el voltaje en cada una de ellas, y por este motivo la energía disponible para cada una debería dividirse por la mitad haciendo que ambas bombillas alumbraran más débilmente. Esto no sería demasiado útil si se tratara de iluminar una casa: cada vez que usted enchufara una nueva bombilla en alguna habitación todas las demás se atenuarían.

Sin embargo, al conectar la segunda bombilla en un circuito unido directamente con el primero, cada bombilla puede lograr experimentar toda su caída de potencial. La corriente se desvía en el empalme y pasa por ambas bombillas separadamente antes de volver a juntarse, de modo que la segunda bombilla brilla con tanta intensidad como la primera. Este tipo de circuito se denomina «circuito en paralelo». El primero, donde las resistencias se encuentran una junto a otra, es un circuito en «serie». La ley de Ohm puede utilizarse con cualquier circuito para calcular el voltaje y la corriente en cualquier punto.

Cronología

1752 d. C.	Franklin desarrolla su experimento con el relámpago.
1826 d. C.	Ohm publica su ley.
1909 d. C.	Millikan mide la carga de un solo electrón.

La idea en síntesis: teoría de los circuitos

21. La regla de la mano derecha de Fleming

Si ha circulado en bicicleta por la noche, quizá haya utilizado una dinamo para hacer funcionar los faros de su bicicleta. Una varilla ondulada se coloca contra el neumático, creando un voltaje suficiente para encender dos bombillas. Cuanto más rápido pedalea, más brillante es la luz. Funciona porque se ha introducido corriente en la dinamo; la dirección del flujo en circulación viene dada por la memorable regla de la mano derecha de Fleming.

La inducción electromagnética se puede utilizar para cambiar entre diferentes formas de campos eléctricos y magnéticos. Se utiliza en los transformadores que controlan la transmisión de energía por la red eléctrica, los adaptadores de viaje e incluso las dinamos de bicicletas. Cuando un campo magnético variable pasa por una bobina de cable, provoca una fuerza en las cargas de su interior que hace que se muevan, estableciendo así una corriente eléctrica.

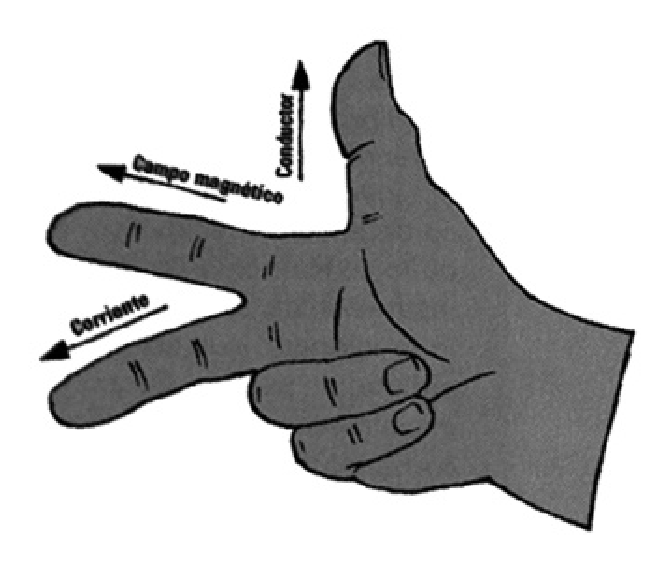
Oculto en el interior del pequeño bote de metal de la dinamo hay un imán y una bobina de cable. La barra sobresaliente que gira contra la rueda hace girar un imán situado en el interior de la bobina de cable. Como el imán al girar produce un cambio de campo magnético, las cargas (electrones) del interior del cable se ponen en movimiento para crear una corriente eléctrica. Se dice que la corriente es inducida en la bobina por medio del fenómeno de la inducción electromagnética.

«El propio Faraday llamó a su descubrimiento magnetización de la luz e iluminación de líneas de fuerzas magnéticas.» Pieter Zeeman, 1903

La regla del pulgar

La dirección de la corriente inducida viene dada por la regla de la mano derecha de Fleming, llamada así por el ingeniero escocés John Ambrose Fleming. Estire la mano derecha y señale con el pulgar hacia arriba, el índice estirado hacia delante y el corazón hacia la izquierda formando un ángulo recto con el índice. Para un conductor que se mueva hacia arriba por su dedo pulgar y un campo magnético que

apunta a través del índice, se inducirá una corriente en la dirección del segundo dedo, los tres formando un ángulo recto cada uno respecto a los demás. Esta regla de la mano es fácil de recordar.



La corriente inducida se puede aumentar enrollando las bobinas de forma más compacta, con el fin de que los campos magnéticos cambien de dirección más veces a lo largo de la longitud del cable, o moviendo el imán con mayor rapidez. Ésta es la razón por la que las dinamos de las bicicletas brillan con mayor intensidad cuando pedaleamos más rápido. No importa si el que se mueve es el imán o la bobina, siempre y cuando se muevan en relación el uno al otro.

La relación entre el campo magnético variable y la fuerza que induce se expresa mediante la ley de Faraday. La fuerza inducida, llamada fuerza electromotriz (a menudo abreviada como FEM) viene dada por el número de vueltas en la bobina multiplicado por la velocidad a la que cambia el flujo magnético (que aumenta con la intensidad del cuerpo magnético y el área de la bobina). La dirección de la corriente inducida siempre se opone a la que se estableció en primer lugar (esto se conoce como ley de Lenz). Si no lo hizo, entonces todo el sistema se autoamplificará y quebrantará la conservación de la energía.

Faraday

La inducción electromagnética fue descubierta por Michael Faraday en la década de

1830. Faraday, un físico británico, se hizo famoso por sus experimentos con la electricidad. No sólo demostró que los imanes giran cuando flotan en un lecho de mercurio, estableciendo el principio del motor eléctrico, sino que demostró que la luz se ve afectada por los campos magnéticos. Al girar el plano de luz polarizada mediante un imán, pensó que la propia luz debía de ser electromagnética.

MICHAEL FARADAY (1791-1867)

El físico británico Michael Faraday fue un autodidacta que se dedicó a leer libros mientras trabajaba como aprendiz de encuadernador. Cuando era joven, Faraday asintió a cuatro conferencias ofrecidas por el químico Humphry Davy en la Royal Institution de Londres y quedó tan impresionado que escribió a Davy pidiéndole trabajo. Después de ser inicialmente rechazado, Faraday comenzó a trabajar y pasó la mayor parte de su tiempo ayudando a otros en la Royal Institution, pero también trabajó con motores eléctricos. En 1826, inauguró los discursos nocturnos de los viernes y las conferencias de Navidad en la Royal Institution, eventos que continúan celebrándose en la actualidad. Faraday trabajó ampliamente en electricidad, descubriendo la inducción electromagnética en 1831. Obtuvo el reconocimiento como investigador altamente especializado y fue nombrado para ocupar diversos puestos oficiales, incluyendo el de asesor científico en Trinity House, donde ayudó a instalar la luz eléctrica en los faroles. Quizá le sorprenda saber que Faraday rechazó un nombramiento de caballero y también la presidencia de la Royal Society (y no una vez, sino dos). Cuando su salud empeoró, Faraday pasó sus últimos días en Hampton Court, en la casa que le fue concedida por el príncipe Albert en reconocimiento de su extensa contribución a la ciencia.

Hasta Faraday, los científicos creían que había muchos tipos diferentes de electricidad, que se manifestaba en diferentes situaciones. Fue Faraday quien demostró que todos estos tipo se podían describir por medio de un único sistema basado en el movimiento de la carga. Faraday no era un matemático y ha llegado incluso a ser denominado «analfabeto matemático», pero sin embargo sus ideas sobre los campos eléctricos y magnéticos fueron recogidos por James Clerk Maxwell, otro físico británico, que las condensó en sus famosas cuatro ecuaciones que todavía son uno de los fundamentos de la física moderna (véase Las ecuaciones de Maxwell).

«Nada es lo bastante maravilloso para ser verdad si está de acuerdo con las leyes de la naturaleza.» Michael Faraday, 1849

Carga almacenada

El nombre de Faraday se le da a una unidad de carga eléctrica, el faradio, que sirve para etiquetar los condensadores de capacidad. Los condensadores son componentes eléctricos que almacenan temporalmente carga y son muy comunes en los circuitos. Por ejemplo, la unidad de flash de una cámara de un solo uso almacena carga mediante un condensador (mientras usted aguarda a que la luz se encienda); cuando usted aprieta el botón del obturador libera la carga para producir el flash cuando se toma la foto. Incluso utilizando una pila normal, el voltaje que acumula puede ser considerable, cientos de voltios, y si toca el condensador le producirá una desagradable carga eléctrica.

El condensador más simple está formado por dos superficies metálicas paralelas separadas por el vacío. Las tapas del bocadillo pueden estar hechas de prácticamente cualquier material siempre que sean conductoras «de pan», o puedan almacenar carga, y el «relleno» no. Los dispositivos más antiguos para almacenar carga eléctrica en el siglo XVIII eran unas botella de cristal, las «botella de Leyden», cuya superficie interior estaba recubierta de metal. Hoy en día, esas tapas del bocadillo están hechas de materiales como lámina de aluminio, niobio, papel, poliéster o teflón. Si se conecta un condensador a una batería, cuando ésta se enciende, en cada tapa se forman cargas opuestas. Cuando la batería está desconectada, las cargas se liberan en forma de corriente. La corriente decrece

porque su «presión» va disminuyendo al reducirse la diferencia de carga. Como se tarda un tiempo en cargar y descargar los condensadores, éstos pueden retrasar sustancialmente el flujo de carga en los circuitos. Los condensadores a menudo se utilizan junto con los inductores (como las bobinas de cable que pueden generar corrientes inducidas) para formar circuitos en los que la carga oscila hacia delante y hacia atrás.

Transformadores

La inducción electromagnética no sólo se utiliza en dinamos y motores, sino también en transformadores eléctricos. Un transformador funciona generando primero un campo magnético y utilizando después éste para inducir una segunda corriente en alguna bobina cercana. Un transformador simple está formado por un anillo magnético con dos bobinas de cable separadas enrolladas alrededor de éste. A través de la primera bobina se bombea un campo eléctrico variable, estableciendo un campo magnético oscilatorio a lo largo del imán. Este campo variable induce después una nueva corriente en la segunda bobina.

Según la ley de Faraday, la magnitud de la corriente inducida depende del número de bucles de la bobina, de modo que el transformador se puede diseñar para modular la magnitud de la corriente saliente. Cuando la electricidad se envía a una red de suministro de alta tensión es más eficiente y seguro evitarla como electricidad de baja corriente y alto voltaje. Los transformadores se utilizan en ambos extremos de la red, haciendo subir el voltaje para reducir la corriente de distribución y conducirla hasta los hogares.

Los transformadores no son 100% eficientes ya que se calientan y pierden energía.

Cronología

1745 d. C.	Se inventa el condensador de la botella de Leyden.
1820 d. C.	Ørsted establece la relación entre electricidad y magnetismo.
1831 d. C.	Faraday descubre la inducción electromagnética.
1873 d. C.	Maxwell publica sus ecuaciones sobre el electromagnetismo.

1892 d. C. Fleming presenta la teoría de los transformadores.

La idea en síntesis: reglas de inducción

22. Las ecuaciones de Maxwell

Las cuatro ecuaciones de Maxwell son una piedra angular de la física moderna y el avance más importante desde la teoría de la gravitación universal. Describen cómo los campos eléctricos y magnéticos son las dos caras de una misma moneda. Ambos tipos de campos son manifestaciones de un mismo fenómeno: la onda electromagnética.

Los primeros investigadores del siglo XIX observaron que la electricidad y el magnetismo se podían intercambiar. Pero James Clerk Maxwell completó uno de los principales hitos de la física moderna cuando consiguió describir todo el ámbito del electromagnetismo en tan sólo cuatro ecuaciones.

Ondas electromagnéticas

Las fuerzas eléctricas y magnéticas actúan sobre partículas cargadas e imanes. Los campos eléctricos variables generan campos magnéticos y viceversa. Maxwell explicó cómo surgían ambos a partir del mismo fenómeno, una onda electromagnética, que presenta tanto características eléctricas como magnéticas. Las ondas electromagnéticas contienen un campo eléctrico variable, acompañado de un campo magnético que varía del mismo modo, pero que forma ángulos rectos con el otro.

Maxwell midió la velocidad de las ondas electromagnéticas que viajan por el vacío, demostrando que es esencialmente la misma que la velocidad de la luz. Combinado con el trabajo de Hans Christian Ørsted y Faraday, esto confirmó que la luz también era una alteración electromagnética que se propagaba. Maxwell demostró que las ondas lumínicas y todas las ondas electromagnéticas viajan a una velocidad constante en el vacío de 300 millones de metros por segundo. Esta velocidad viene determinada por las propiedades eléctricas y magnéticas absolutas del espacio vacío.

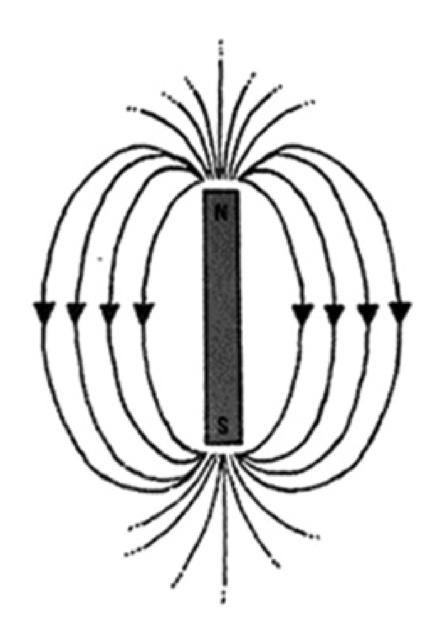
Las ondas electromagnéticas pueden tener una amplia gama de longitudes de onda y cubren todo el espectro más allá de la luz visible. Las ondas de radio tienen las

longitudes de onda más largas (metros o incluso kilómetros), la luz visible tiene longitudes de onda similares al espaciado entre los átomos mientras que las frecuencias más altas corresponden a los rayos X y los rayos gamma. Las ondas electromagnéticas se utilizan principalmente en las comunicaciones, por medio de la transmisión de ondas de radio, televisión y señales de teléfono móvil. Éstas proporcionan energía calorífica, como en los hornos microondas, y con frecuencia se utilizan como sondas (por ejemplo, los rayos X en medicina y en los microscopios electrónicos).

La fuerza electromagnética ejercida por los campos electromagnéticos es una de las cuatro fuerzas fundamentales, junto con la gravedad y las fuerzas nucleares fuerte y débil que mantienen unidos núcleos y átomos Las fuerzas electromagnéticas son cruciales en química, donde unen iones cargados para formar compuestos químicos y moléculas.

Campos

Maxwell comenzó tratando de comprender el trabajo de Faraday que describía los campos eléctricos y magnéticos de forma experimental. En física, los campos eléctricos y magnéticos de forma experimental.



En física, los campos son la forma en que las fuerzas se transmiten a través de la

distancia. La gravedad actúa incluso a través de las inmensas distancias espaciales, donde se dice que produce un campo gravitatorio. Del mismo modo, los campos eléctricos y magnéticos afectan a las partículas cargadas a una distancia considerable. Si alguna vez ha jugado con limaduras de hierro diseminadas en una hoja de papel con un imán debajo, habrá observado que la fuerza magnética mueve el polvo de hierro formando bucles que se extienden del polo norte al sur del imán. La fuerza del imán también decae a medida que lo alejamos. Faraday recogió estas «líneas de campo» en un gráfico y formuló unas reglas muy simples. También recogió en el gráfico líneas de campos similares para formas cargadas eléctricamente, pero no era un matemático experimentado.

Así que la tarea de tratar de unificar estas dispares ideas en una teoría matemática recayó sobre Maxwell.

Cuatro ecuaciones

Para sorpresa de todos los científicos, Maxwell logró describir la totalidad de los variados fenómenos electromagnéticos en tan sólo cuatro ecuaciones fundamentales.

$$\nabla \cdot D = \rho$$

$$\nabla \times H = J + (\delta D / \delta t)$$

$$\nabla \cdot B = 0$$

$$\nabla \times E = -(\delta B / \delta t)$$

Ecuaciones de Maxwell

En la actualidad, estas ecuaciones son tan famosas que se han llegado a fabricar camisetas con la leyenda «y dios creó la luz». Aunque ahora pensamos en el

electromagnetismo como una única cosa, en aquella época esta idea era radical y tan importante como si hoy uniéramos la física cuántica y la gravedad.

La primera de las ecuaciones de Maxwell es la ley de Gauss, llamada así por el físico del siglo XIX Carl Friedrich Gauss, que describe la forma y la intensidad del campo eléctrico que se genera mediante un objeto cargado. La ley de Gauss es una ley de la inversa del cuadrado, matemáticamente similar a la ley de la gravedad de Newton. Como sucede con la gravedad, el campo eléctrico se aleja de la superficie de un objeto cargado en proporción al cuadrado de la distancia. Por tanto, el campo es cuatro veces más débil si nos alejamos el doble de él.

Aunque no hay pruebas científicas de que las señales del teléfono móvil sean perjudiciales para la salud, la ley de la inversa del cuadrado explica por qué es más seguro tener un repetidor de teléfonos móviles cerca de casa que lejos. El campo del transmisor del repetidor decae rápidamente con la distancia, así que cuando nos alcanza es ya muy débil. En cambio, el campo de un teléfono móvil es fuerte porque lo sostiene junto a su cabeza. Así pues, cuanto más cerca esté el repetidor menos energía potencialmente dañina utiliza el móvil cuando hablamos por él. Sin embargo, la gente es a menudo irracional y teme más a los repetidores.

JAMES CLERK MAXWELL (1831-1879)

James Clerk Maxwell nació en Edimburgo, Escocia. Creció en el campo, donde desarrolló una curiosidad por el mundo natural. A la muerte de su madre, fue enviado a un colegio a Edimburgo donde le pusieron el mote de «bobalicón» por mostrarse muy absorbido por sus estudios. Como estudiantes en la Universidad de Edimburgo y más tarde en Cambridge, Maxwell era inteligente, aunque desorganizado. Tras graduarse, amplió el trabajo de Faraday sobre la electricidad y el magnetismo y lo condensó en ecuaciones. Maxwell regresó a Escocia cuando su padre enfermó y trató de encontrar de nuevo un trabajo en Edimburgo. Persuadido por su viejo mentor, se dirigió al King’s College de Londres, donde desarrolló su famoso trabajo. Hacia 1862 calculó que la velocidad de las ondas electromagnéticas y de la luz era la misma y once años

más tarde publicó sus cuatro ecuaciones sobre el electromagnetismo.

La segunda de las ecuaciones de Maxwell describe la forma y la intensidad del campo magnético, o patrón de las líneas del campo magnético, alrededor de un imán. Establece que las líneas del campo siempre son bucles cerrados, desde el polo norte al sur. En otras palabras, todos los imanes tienen que tener un polo norte y un polo sur, no existen monopolos magnéticos y un campo magnético siempre tiene un principio y un fin. Esto se deduce de la teoría atómica en la que incluso los átomos poseen campos magnéticos y si esos campos están alineados se produce un magnetismo a gran escala. Si cortamos una barra magnética por la mitad, siempre reproducimos los polos norte y sur en cada mitad. No importa cuánto dividamos el imán: los fragmentos más pequeños conservan ambos polos.

«Cualquier loco inteligente puede hacer cosas más grandes y más complejas… Pero hace falta un toque de genialidad, y un montón de valor para moverse en dirección contraria.» Atribuido a Albert Einstein, 1879-1955

Al tratar de unir el electromagnetismo y la teoría cuántica en la década de 1930, el físico británico Paul Dirac vaticinó que podían existir los monopolos magnéticos.

Nadie ha verificado aún esta idea.

La tercera y cuarta ecuaciones son bastante similares y describen la inducción magnética. La tercera ecuación nos informa de cómo las corrientes variables producen campos magnéticos variables producen corrientes eléctricas. Esta última es tan común como la ley de la inducción de Faraday.

Describir tantos fenómenos en unas ecuaciones tan simples fue un hecho de suma importancia que condujo a Einstein a encumbrar el logro de Maxwell a la altura del de Newton. Einstein tomó las ideas de Maxwell y las desarrolló en sus teorías de la relatividad. En las ecuaciones de Einstein, el magnetismo y la electricidad eran manifestaciones de la misma cosa vistas por observadores en diferentes marcos de

referencia; un campo eléctrico en un contexto en movimiento sería percibido como un campo magnético en otro contexto. Quizá fue Einstein el que en último término pensó que los campos magnéticos y eléctricos son verdaderamente una misma cosas.

Cronología

1600 d. C.	William Gilbert investiga la electricidad y el magnetismo.
1752 d. C.	Benjamin Franklin lleva a cabo sus experimentos de los relámpagos.
1820 d. C.	Ørsted vincula electricidad y magnetismo.
1831 d. C.	Faraday descubre la inducción electromagnética.
1873 d. C.	Maxwell publica sus ecuaciones sobre el electromagnetismo.
1905 d. C.	Einstein publica la teoría especial de la relatividad.

La idea en síntesis: ...y se hizo la luz

Sección 3
ENIGMAS CUÁNTICOS

23. La ley de Planck

¿Por qué decimos que un fuego está al rojo vivo? ¿Y por qué el acero primero es de un rojo brillante, luego amarillo y después blanco cuando se calienta? Max Planck describió estos cambios de color uniendo la física del calor y la luz. Al describir la luz estadísticamente en lugar de como una onda continua, la revolucionaria idea de Planck constituyó el germen del nacimiento de la física cuántica.

En un famoso discurso de 1963, el primer ministro británico Harold Wilson se maravilló ante «el calor blanco de esta revolución [tecnológica]». Pero ¿de dónde viene esta frase de «calor blanco»?

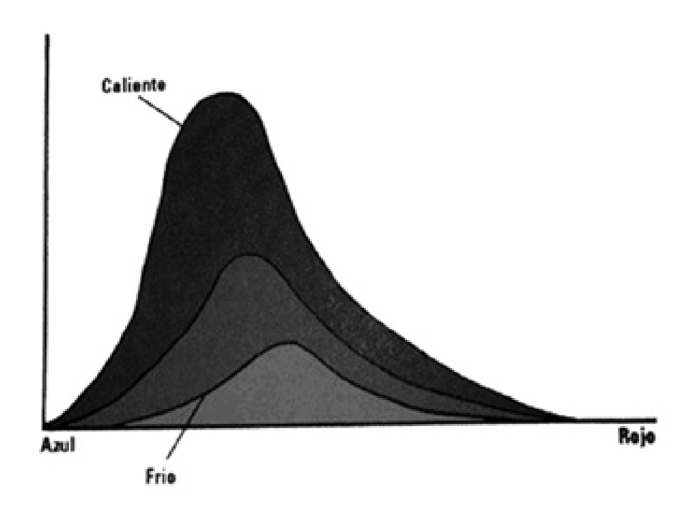
El color del calor

Todos sabemos que muchas cosas brillan cuando se calientan. El carbón en las barbacoas y los anillos de las estufas eléctricas se vuelven rojos, alcanzando cientos de grados Celsius.

La lava volcánica, que se aproxima a los mil grados Celsius (similar a la temperatura del acero fundido) puede brillar con mayor fiereza: a veces naranja, amarillo o incluso rojo blanco. El filamento de tungsteno de una bombilla supera los 3.000 grados Celsius, igual que la superficie de una estrella; de hecho, con una temperatura creciente, los cuerpos calientes brillan primero de color rojo, luego amarillo y finalmente blanco. La luz parece blanca porque se ha añadido más luz azul a la roja y amarilla ya existentes. Este despliegue de colores se describe como espectro de un cuerpo negro.

Las estrellas también siguen esta secuencia: cuanto más calientes están, más azules parecen. El Sol, a 6.000 kelvin, es amarillo, mientras que la superficie del gigante rojo Betelgeuse (descubierto en Orión) tiene la mitad de esa temperatura.

Estrellas más calientes como Sirio, la más brillante del firmamento, cuya abrasadora superficie alcanza los 30.000 kelvin, tiene un aspecto blanco-azulado.



A medida que las temperaturas aumentan, cada vez desprenden más luz azul de alta frecuencia. De hecho, la luz más potente de las estrellas calientes es tan azul que la mayor parte de ella irradia desde la zona ultravioleta del espectro.

MAX PLANCK (1858-1947)

Max Planck fue a la escuela en Munich, Alemania. Con la esperanza de poder consolidar una carrera musical, buscó el consejo de un músico sobre los estudios que debía realizar, pero la respuesta fue que si tenía que preguntarlo es que debería estudiar otra coas. Su profesor de física no le animó mucho más, diciéndole que la física como ciencia estaba ya completa y no se podía aportar nada más. Por suerte, Planck le ignoró y continuó su investigación, sorprendiendo con su concepto de los cuantos. Durante su vida Planck sufrió la muerte de su mujer y de varios hijos, incluyendo dos que fallecieron durante las guerras mundiales. Sin embargo, Planck permaneció en Alemania y al término de las dos guerras trató de reconstruir la investigación física en ese país. Actualmente hay muchos prestigiosos institutos que llevan el nombre de Max Planck.

La radiación de un cuerpo negro

Los físicos del siglo XIX se sorprendieron al encontrar que la luz emitida cuando los objetos se calentaban seguía el mismo patrón independientemente de la sustancia que estuvieran analizando. La mayor parte de la luz se desprendía a una frecuencia determinada. Cuando se elevaba la temperatura, la frecuencia de los picos se desplazaba hacia longitudes de onda más azules (más cortas), cambiando del rojo al amarillo y finalmente al blanco-azulado.

«[La teoría del cuerpo negro fue] un acto de desesperación porque había que hallar una interpretación teórica a cualquier precio, sin importar lo alto que fuera.» Max Planck, 1901

Utilizamos el término radiación de un cuerpo negro por una buena razón. Los materiales oscuros son más capaces de irradiar que de absorber calor. Si ha llevado una camiseta negra en un día caluroso sabrá que se calienta al Sol más que una blanca. El blanco refleja mejor la luz solar, y ésta es la razón por la que en las zonas de clima caluroso las casas estén pintadas de blanco. La nieve también refleja la luz del Sol. Los científicos que estudian el clima se preocupan porque la Tierra se calentará con mayor rapidez si el hielo de los polos se derrite y éstos reflejan menos luz solar en el espacio. Los objetos negros no sólo absorben, sino que también liberan calor con mayor rapidez que los blancos. Ésta es la razón por la que las superficies de las estufas o las chimeneas se pinten de negro —¡no sólo para ocultar el hollín!

El legado de Planck en el espacio

El espectro más perfecto de un cuerpo negro procede de una fuente cósmica. El cielo está bañado por el débil resplandor de microondas que no son sino la luminiscencia de la bola de fuego del propio big bang, desplazado hacia el rojo por la expansión del universo a frecuencias más bajas. Este brillo se denomina radiación del fondo cósmico. En los años noventa, el satélite COBE (COsmic Background Explorer, «explorador de fondo cósmico») de la NASA midió la temperatura de esta luz: tiene un espectro de cuerpo negro de 2,73 K y es tan uniforme que sigue siendo el espectro del cuerpo negro

más puro medido hasta la actualidad. Ningún material terrestre tiene una temperatura tan precisa. La Agencia Espacial Europea honró recientemente a Planck bautizando a su nuevo satélite con su nombre. Éste se ocupará de recoger todos los detalles de la radiación de microondas del fondo cósmico.

Una revolución

Aunque los físicos habían medido los gráficos de los cuerpos negros, no los entendían, ni tampoco podían explicar por qué la frecuencia alcanzaba un pico en un solo color. Los grandes pensadores Wilhelm Wien, Lord Rayleigh y James Jeans propusieron soluciones parciales. Wien describió matemáticamente el oscurecimiento en las frecuencias del azul, mientras que Rayleigh y Jeans explicaron el espectro creciente del rojo, pero ambas fórmulas fracasaron en los extremos opuestos. La solución de Rayleigh y Jeans, en especial, planteó problemas porque predecía que a longitudes de onda ultravioletas y por encima sería liberada una cantidad infinita de energía debido a que el espectro siempre crecía. Este evidente problema se denominó la «catástrofe ultravioleta».

Al tratar de comprender la radiación de los cuerpos negros, el físico alemán Max Planck unió la física del calor y la de la luz. Planck era un físico purista a quien gustaba retornar a lo básico para deducir principios físicos. Estaba fascinado por el concepto de entropía y por la segunda ley de la termodinámica. Consideraba éstos y las ecuaciones de Maxwell, leyes fundamentales de la naturaleza y se propuso demostrar cómo estaban relacionadas. Planck tenía una fe ciega en las matemáticas: si sus ecuaciones le indicaban que algo era cierto, no importaba que el resto del mundo pensara otra cosa.

Planck aplicó de mala gana una solución inteligente para que su ecuación funcionara. Su idea fue tratar la radiación electromagnética de la misma forma que los expertos en termodinámica trataban el calor. Igual que la temperatura es la acción compartida de energía calorífica entre muchas partículas, Planck describió la luz asignando energía electromagnética entre un conjunto de osciladores electromagnéticos o diminutas unidades subatómicas de un campo electromagnético.

Para que cuadrara matemáticamente, Planck estableció la proporción entre la energía de cada unidad electromagnética con la frecuencia, de tal modo que $E=hv$, donde E es la energía, v es la frecuencia de la luz y h es un factor constante de proporcionalidad que hoy se conoce como constante de Planck. Estas unidades fueron denominadas «cuantos», por el término latino para «cuánto».

En el nuevo panorama de los cuantos de energía, los osciladores electromagnéticos de alta frecuencia asumían cada uno una energía elevada. Por tanto, no podía haber demasiados en ningún sistema sin rebasar el límite energético. De la misma manera, si recibimos el salario mensual en 100 billetes de banco de diversos valores, recibimos en su mayor parte valores medios y unos cuantos de mayor o menor valor. Al calcular el modo más probable de compartir la energía electromagnética entre los numerosos osciladores, el modelo de Planck asignaba la mayor parte de la energía a las frecuencias medias; encajaba con el espectro de picos del cuerpo negro. En 1901, Planck publicó su ley, estableciendo la relación entre las ondas lumínicas y la probabilidad con gran aceptación. Y muy pronto se hizo evidente que su nueva idea resolvía el problema de la «catástrofe ultravioleta».

Los cuantos de Planck no fueron más que una construcción para calcular las operaciones matemáticas de su ley; ni por un momento imaginó que sus osciladores fueran reales. Pero, en una época en la que la física atómica se desarrollaba a una velocidad vertiginosa, la novedosa formulación de Planck tuvo consecuencias sorprendentes. Planck había plantado una semilla que iba a crecer para convertirse en una de las áreas más importantes de la física moderna: la teoría cuántica.

Cronología

1862 d. C.	Gustav Kirchhoff utiliza el término «cuerpo negro».
1901 d. C.	Planck publica su ley de la radiación de los cuerpos negros.
1905 d. C.	Einstein identifica el fotón y refuta la catástrofe ultravioleta.
1996 d. C.	Los datos del satélite COBE determinan la

temperatura exacta de la radiación de microondas del fondo cósmico.

La idea en síntesis: balance energético

24. El efecto fotoeléctrico

Cuando una luz ultravioleta se refleja sobre una lámina de cobre se produce electricidad. El efecto «fotoeléctrico» fue un misterio hasta que Albert Einstein, inspirándose en el uso de los cuantos de energía de Max Planck, discurrió la idea de la partícula de luz o fotón. Einstein demostró que la luz se comportaba como una corriente de proyectiles fotones además de como una onda continua.

El amanecer del siglo XX abrió una nueva puerta a la física. En el siglo XIX era sabido que la luz ultravioleta movilizaba electrones para producir corrientes en un metal; la comprensión de este fenómeno condujo a los físicos a inventar todo un nuevo lenguaje.

Bateadores azules

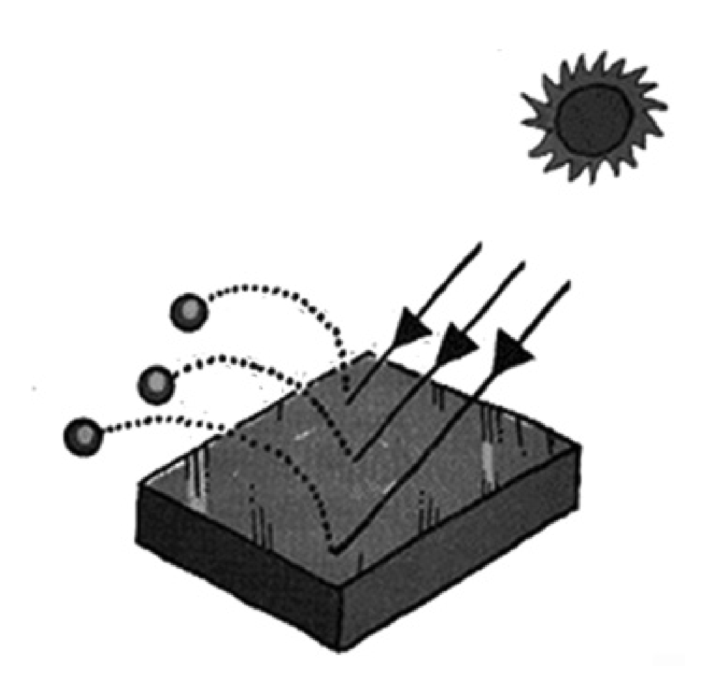
El efecto fotoeléctrico genera corrientes eléctricas en los metales cuando se proyecta sobre ellos luz azul o ultravioleta, pero esto no ocurre con luz roja. Ni siquiera un rayo brillante de luz roja logra producir una corriente. La carga sólo circula cuando la frecuencia de la luz excede un umbral determinado, que varía según los metales. El umbral indica que es necesario generar una cierta cantidad de energía ante de que se puedan liberar las cargas. La energía necesaria para liberarlas tiene que proceder de la luz pero, a finales del siglo XIX, este mecanismo era desconocido. Las ondas electromagnéticas y las cargas en movimiento parecían fenómenos físicos muy diferentes y unirlos constituía un desafío de gran envergadura.

«Toda cuestión tiene dos caras.»
Pitágoras, 485-421 a. C.

Fotones

En 1905, Albert Einstein aportó una idea radical para explicar el efecto fotoeléctrico. Fue este trabajo, y no la relatividad, el que le valió el Premio Nobel en 1921. Inspirado por el uso previo que Max Planck había hecho de los cuantos para cuantificar la energía de los átomos calientes, Einstein imaginó que la luz también

podría existir en pequeños paquetes de energía. Einstein tomó prestada la definición matemática general de los cuantos de Planck, la proporcionalidad de la energía y la frecuencia unidas por la constante de Planck, y la aplicó a la luz en lugar de a los átomos. Los cuantos de luz de Einstein fueron llamados posteriormente fotones. Los fotones carecen de masa y viajan a la velocidad de la luz.



En lugar de envolver el metal con ondas lumínicas continuas, Einstein sugirió que los proyectiles fotones individuales chocan con los electrones que se mueven en el metal para producir el efecto fotoeléctrico. Como cada fotón transporta una cierta energía, proporcional a su propia frecuencia, la energía del electrón contra el que choca también es proporcional a la frecuencia de la luz. Un fotón de luz roja (con una baja frecuencia) carece de la energía suficiente para desplazar a un electrón, pero un fotón azul (luz con una frecuencia más elevada) tiene más energía y puede ponerlo en movimiento. Un fotón ultravioleta tiene una energía aún mayor, de modo que puede golpear con fuerza a un electrón e imprimirle una velocidad mayor. Si aumentamos el brillo de la luz no se producen cambios, independientemente de la cantidad de fotones rojos que haya, si ninguno de ellos es capaz de movilizar a los electrones. Es como disparar pelotas de ping-pong a un

pesado vehículo todoterreno. La idea de los cuantos de luz de Einstein fue impopular al principio porque se oponía a la descripción de la luz como una onda, resumida en las ecuaciones de Maxwell que la mayor parte de los físicos reverenciaban. Sin embargo, el clima cambió cuando los experimentos demostraron que la extravagante idea de Einstein era cierta. Confirmaron que la energía de los electrones liberados aumentaba proporcionalmente con la frecuencia de la luz.

Dualidad onda-partícula

La propuesta de Einstein no sólo fue controvertida, sino que planteó la incómoda idea de que la luz era a la vez una onda y una partícula, lo que se denomina dualidad onda-partícula. Hasta que Maxwell escribió sus ecuaciones, el comportamiento de la luz siempre había seguido el de la onda, rodeando los obstáculos, difractándose, reflejando y produciendo interferencias. Así las cosas, Einstein realmente creó un problema al mostrar que la luz también era una corriente de torpedos fotones.

ALBERT EINSTEIN (1879-1955)

1905 fue un annus mirabilis para el físico a tiempo parcial, nacido en Alemania, que trabajaba como funcionario de la Oficina Suiza de Patentes. Albert Einstein publicó tres artículos de física en un periódico alemán, Annalen der Physik. Explicaban el movimiento browniano, el efecto fotoeléctrico y la relatividad espacial, y cada uno de ellos fue un trabajo innovador. La reputación de Einstein creció hasta que, en 1915, desarrolló su teoría de la relatividad general y se hizo mundialmente famoso. En 1921, Einstein recibió el Premio Nobel por su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico, que tuvo una gran repercusión en el desarrollo de la mecánica cuántica.

Los físicos todavía están debatiendo esta cuestión. En la actualidad, sabemos incluso que la luz sabe si debe comportarse como una u otra cosa en diferentes circunstancias. Si desarrollamos un experimento para medir sus propiedades como onda, por ejemplo, pasarla por una red de difracción, se comporta como una onda. Si en lugar de esto intentamos medir sus propiedades como partícula, es también cumplidora.

Los físicos han tratado de diseñar experimentos más inteligentes para capturar la luz y quizá desvelar su auténtica naturaleza, pero hasta ahora todos han fracasado. Muchos son variantes del experimento de la doble rendija de Young, pero con componentes que pueden cambiar dentro y fuera. Imaginemos una fuente de luz cuyos rayos pasan a través de dos estrechas rendijas hasta una pantalla. Con ambas rendijas abiertas vemos las familiares bandas claras y oscuras de los límites de interferencia. De modo que, según lo que sabemos, la luz es una onda. Sin embargo, al disminuir la luz lo suficiente, en algún punto determinado el nivel baja tanto que los fotones individuales pasan por el aparato uno a uno y un detector captura los destellos cuando llegan a la pantalla. Incluso al hacer esto, los fotones continúan amontonándose en el patrón de interferencia rayado.

«La capa superficial del cuerpo es atravesada por cuantos de energía, y esta energía se convierte al menos parcialmente en energía cinética de los electrones. La concepción más sencilla es que un cuanto de luz transfiere toda su energía a un solo electrón.» Albert Einstein, 1905

Placas solares

El efecto fotoeléctrico se utiliza actualmente en los paneles solares en los que la luz libera electrones, normalmente procedentes de materiales semiconductores, como la silicona, en lugar de materiales puros.

Entonces, ¿cómo sabe un fotón si debe dirigirse por una u otra de las rendijas para formar el patrón de interferencia? Si va usted rápido, puede cerrar una de las rendijas antes de que el fotón haya abandonado la fuente de luz o incluso después

de que haya pasado por las rendijas, pero antes de que alcance la pantalla. En todos los casos que los físicos han logrado analizar, los fotones sabían si había una o dos rendijas cuando pasaron. Y aunque sólo pasan fotones individuales, parece que cada fotón pasa por ambas rendijas simultáneamente.

Coloque un detector en una de las rendijas (así sabrá si el fotón pasó por ésa o por la otra) y por extraño que parezca el patrón de interferencia desaparece: en la pantalla sólo queda un simple grupo de fotones sin bandas de interferencia. Así que no importa sus esfuerzos por capturarlos, los fotones saben cómo actuar. Y actúan como ondas y como partículas, y no como una u otra.

Ondas de materia

En 1924, Louis-Victor de Broglie sugirió la idea contraria, que las partículas de materia también se comportaban como ondas. Proponía que todos los cuerpos tienen una longitud de onda asociada, lo que implica que la dualidad partícula-onda era universal. Tres años después la idea onda-materia fue confirmada cuando se comprobó que los electrones difractaban y producían interferencias igual que la luz. Los físicos han observado ahora partículas mayores que se comportan como ondas, por ejemplo, los neutrones, los protones y recientemente incluso moléculas incluyendo las esferas microscópicas de carbono o «buckyesferas». Objetos de mayor tamaño, como los cojinetes de bolas y las brocas, tienen longitudes de onda minúsculas, demasiado pequeñas para poder verlas. Así que no podemos constatar que se comporten como ondas. Una pelota de tenis que atraviesa una pista volando tiene una longitud de onda de 10^{-34} metros, mucho menor que el ancho de un protón (10^{-15} m).

Como hemos visto, la luz también es una partícula y los electrones a veces son ondas; el efecto fotoeléctrico ha completado el círculo.

Cronología

1839 d. C.	Alexandre Becquerel observa el efecto fotoeléctrico.
1887 d. C.	Hertz mide chispas eléctricas entre agujeros causadas por la luz ultravioleta.
1899 d. C.	J. J. Thomson confirma que los electrones son

	generados por la luz incidente.
1901 d. C.	Planck introduce el concepto de cuantos de energía.
1905 d. C.	Einstein propone la teoría de los cuantos de luz.
1924 d. C.	De Broglie propone que las partículas pueden comportarse como ondas.

La idea en síntesis: proyectiles fotones

25. La ecuación de ondas de Schrödinger

¿Cómo podemos saber dónde se encuentra una partícula si también se ha propagado como una onda? Erwin Schrödinger escribió una famosa ecuación que describe la probabilidad de que una partícula se encuentre en un punto determinado si se comporta como una onda. Su ecuación ilustró además los niveles de energía de los electrones en los átomos, haciendo despegar no sólo a la mecánica cuántica, sino a la química moderna.

Según Einstein y Louis-Victor de Broglie, las partículas y las ondas están íntimamente relacionadas. Las ondas electromagnéticas, incluida la luz, adoptan ambas características e incluso las moléculas y las partículas subatómicas de materia pueden difractar e interferir como ondas.

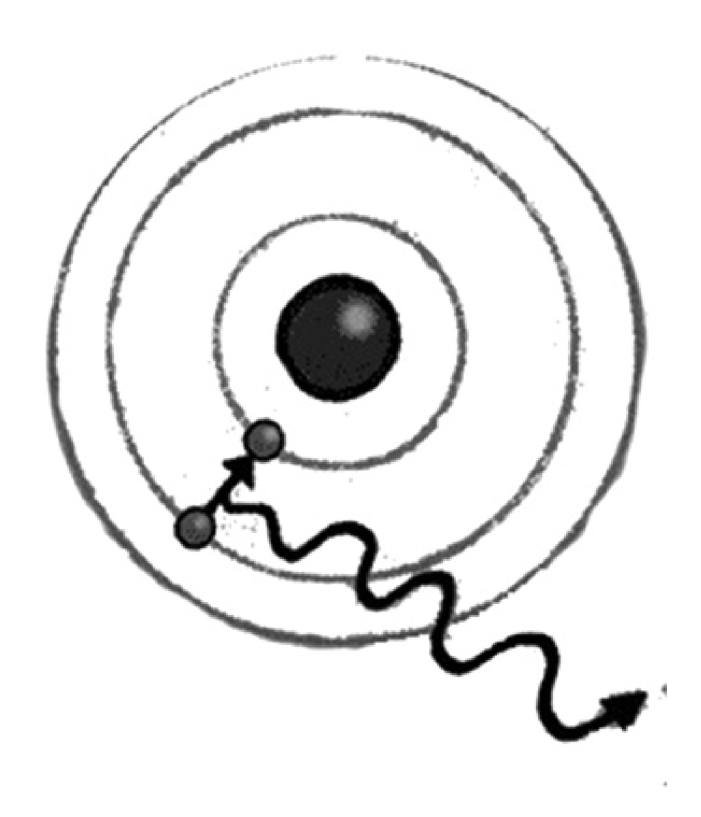
Pero las ondas son continuas, mientras que las partículas no. Entonces, ¿cómo podemos saber dónde se encuentra una partícula si se propaga en forma de onda? La ecuación de Schrödinger, diseñada por el físico austríaco. Erwin Schrödinger en 1926, describe la probabilidad de que una partícula que se comporta como una onda se encuentre en un punto determinado, utilizando la física de ondas y la probabilidad. Es uno de los fundamentos de la mecánica cuántica, la física del mundo atómico.

La ecuación de Schrödinger se utilizó por primera vez para describir la posición de los electrones en un átomo. Schrödinger trató de describir el comportamiento de los electrones como ondas y también incorporó el concepto de cuantos de energía introducido por Max Planck, la idea de que la energía de ondas se transmite en bloques de construcción básicos cuya energía es proporcional a la frecuencia de las ondas. Los cuantos son los bloques más pequeños, proporcionando una granulación fundamental a cualquier onda.

El átomo de Bohr

Fue el físico danés Niels Bohr quien aplicó la idea de la energía cuantizada a los electrones del átomo. Como los electrones son liberados fácilmente del átomo y

están cargados negativamente, Bohr pensó que, igual que los planetas giran alrededor del Sol, los electrones orbitan alrededor de núcleos cargados positivamente. Sin embargo, los electrones sólo podían existir con ciertas energías, que correspondían a múltiplos ce cuantos básicos de energía. Para los electrones que se encontraban en el interior de un átomo, estos estados de energía deberían restringir a los electrones a distintas capas (u «orbitales») de acuerdo con su energía. Es como si los planetas sólo pudieran encontrarse en ciertos orbitales, definidos por reglas energéticas.



El modelo de Bohr tuvo un gran éxito, especialmente a la hora de explicar el átomo simple de hidrógeno. El hidrógeno contiene un solo electrón que gira alrededor de un único protón, una partícula con carga positiva que actúa como núcleo. La jerarquía de Bohr de energías cuantizadas explicaba conceptualmente las longitudes de onda características de la luz que eran emitidas y absorbidas por el hidrógeno.

Igual que al subir una escalera de mano, si el electrón de un átomo de hidrógeno recibe un impulso energético, puede saltar a un peldaño superior u orbital. Para

saltar al peldaño superior el electrón tiene que absorber energía de un fotón que tenga exactamente la energía necesaria para hacerlo. Por lo tanto, hace falta una frecuencia de luz concreta para elevar el nivel energético del electrón. Cualquier otra frecuencia no servirá. Alternativamente, una vez impulsado, el electrón podría volver a saltar al peldaño inferior, emitiendo un fotón de luz de esa frecuencia al hacerlo.

Huellas espectrales

Al hacer que los electrones asciendan por la escalera energética, el gas hidrógeno absorbe una serie de fotones de frecuencias características que corresponden a los vacíos energéticos entre los peldaños. Si se proyecta luz blanca a través del gas, estas frecuencias aparecen oscurecidas porque toda la luz se absorbe en cada vacío de frecuencia. En cambio, si el hidrógeno está caliente y sus electrones partieron de los peldaños superiores de la escalera, el resultado son líneas brillantes. Estas energías características del hidrógeno se pueden medir, y están de acuerdo con las predicciones de Bohr. Todos los átomos producen líneas similares, a diferentes energías características. De modo que son huellas diferentes que identifican especies químicas individuales.

Funciones de onda

Los niveles energéticos de Bohr funcionaron muy bien para el hidrógeno, pero no así para otros átomos con más de un electrón y con núcleos más pesados. Además, estaba el enigma de De Broglie de que los electrones deberían ser considerados también como ondas. Así que cada orbital electrónico podría considerarse también como un frente de onda. Pero imaginarlo como una onda también implicaba que era imposible determinar dónde se encontraba el electrón en un momento determinado.

En una caja

Una partícula solitaria flotando en el espacio libre tiene una función de onda que recuerda a una onda senoidal. Si está encerrada en una caja, su función de onda debe descender hasta cero en las paredes

de la caja y en el exterior porque no puede estar allí. La función de onda en el interior de la caja se puede determinar considerando los niveles permitidos de energía, o cuantos de energía, de la partícula, los cuales tienen que ser siempre mayores que cero. Como la teoría cuántica sólo permite niveles energéticos específicos, es más probable que la partícula se encuentre en unos lugares que en otros, y hay sitios dentro de la caja donde la partícula nunca se encontrará, donde la función de onda es cero. Otros sistemas más complejos tienen funciones de onda que son una combinación de muchas ondas sensoriales y otras funciones matemáticas, como un sonido musical compuesto de numerosos armónicos. En la física convencional, utilizamos las leyes de Newton para describir el movimiento de una partícula en una caja (como un cojinete de bolas en miniatura). En cualquier momento, sabríamos exactamente dónde está y la dirección en que se mueve. Sin embargo, en mecánica cuántica sólo podemos referirnos a la probabilidad de que una partícula se encuentre en un lugar determinado en un momento dado, y como la cuantización de la energía se filtra a escala atómica, hay lugares preferidos en los que se encontrará la partícula. Pero no podemos precisar dónde se encuentra exactamente porque también es una onda.

Schrödinger, inspirado por De Broglie, desarrolló una ecuación que describía la posición de una partícula cuando se comportaba como una onda. Sólo consiguió hacerlo estadísticamente incorporando la probabilidad. La importante ecuación de Schrödinger constituye una parte fundamental de la mecánica cuántica.

Schrödinger introdujo la idea de la función de onda para expresar la probabilidad de que la partícula estuviera en un momento determinado y para incluir toda la información posible acerca de esa partícula. Las funciones de onda son notablemente difíciles de comprender, ya que no podemos observarlas a través de nuestra experiencia y nos parecen muy difíciles de visualizar e incluso de interpretar filosóficamente.

«Dios pone a funcionar el electromagnetismo de acuerdo con la teoría de ondas los lunes, miércoles y viernes, y el diablo de acuerdo con la teoría cuántica los martes, jueves y sábados.» Sir William Bragg, 1862-1942

El gran avance que auguraba la ecuación de Schrödinger también condujo a modelos de orbitales electrónicos en los átomos. Éstos son perfiles de probabilidad que señalan regiones en las que existe entre un 80 y un 90% de probabilidades de que los electrones se encuentren (planteando la cuestión de que existía una pequeña probabilidad de que se encontraran en otro lugar completamente diferente). Resultó que estos perfiles no eran orbitales esféricos, como Bohr imaginó, sino formas más alargadas, como mancuernas o donuts. Actualmente los químicos utilizan estos conocimientos para diseñar moléculas.

La ecuación de Schrödinger revolucionó la física introduciendo la idea de la dualidad onda-partícula no sólo en los átomos, sino en toda la materia. Junto con Werner Heisenberg y otros, Schrödinger es verdaderamente uno de los padres fundadores de la mecánica cuántica.

Cronología

1897 d. C.	J. J. Thomson descubre el electrón.
1913 d. C.	Bohr propone los orbitales electrónicos alrededor del núcleo atómico.
1926 d. C.	Schrödinger desarrolla su ecuación de ondas.

La idea en síntesis: aquí, allá, pero no en todas partes

26. El principio de incertidumbre de Heisenberg

El principio de incertidumbre de Heisenberg afirma que la velocidad (o momento) y la posición de una partícula en un instante determinado no se pueden conocer con exactitud: cuanto mayor es la precisión con que se mide una, menos se conoce la otra. Werner Heisenberg argumentó que el propio acto de observar una partícula la cambia, haciendo imposible un conocimiento preciso. Por lo tanto, no se puede predecir con certeza ni el comportamiento pasado ni el futuro de una partícula subatómica. El determinismo ha muerto.

En 1927 Heisenberg se dio cuenta de que la teoría cuántica contenía ciertas predicciones extrañas. Implicaba que los experimentos nunca podían realizarse en completo aislamiento porque el propio acto de medir afectaba al resultado. Expresó esta conexión en su «principio de incertidumbre»: no se puede medir simultáneamente la posición y el momento de una partícula subatómica (o de forma equivalente su energía en un momento exacto). Si se conoce uno de los dos, el otro siempre es incierto. Se pueden medir ambos dentro de ciertos límites, pero cuanto más ajustadamente se especifican estos límites para uno, más imprecisos son para el otro. Argumentó que esta incertidumbre era una importante consecuencia de la mecánica cuántica —no tenía nada que ver con una falta de habilidad o de exactitud en las mediciones.

Incertidumbre

En cualquier medición, hay un elemento de incertidumbre en la respuesta. Si medimos la longitud de una mesa con una cinta métrica, podemos afirmar que tiene un metro de largo, pero la cinta sólo puede afirmarlo con un margen de error de un milímetro, pues éste es el tamaño más pequeño marcado que contiene. Así pues, la mesa podría en realidad tener 99,9 cm o 100,1 cm y no lo sabríamos.

Es fácil pensar en las incertidumbres como algo debido a las limitaciones de nuestro dispositivo medidor, como la cinta métrica, pero la afirmación de Heisenberg se refiere a algo radicalmente diferente. Afirma que nunca se pueden conocer ambas

magnitudes, momento y posición, de forma exacta y al mismo tiempo, independientemente de lo exacto que sea el dispositivo que utilicemos para medir. Es como si cuando medimos la posición de un nadador no pudiéramos conocer su velocidad en ese mismo instante. Se pueden conocer las dos aproximadamente, pero en cuanto se ponen en relación una con otra se vuelve más incierto.

Medición

¿Cómo se plantea este problema? Heisenberg imaginó un experimento que medía el movimiento de una partícula subatómica como el neutrón. Para hacer un seguimiento de la trayectoria de la partícula se utilizaba un radar que hacía rebotar ondas electromagnéticas en ella. Para obtener la máxima precisión escogeríamos los rayos gamma, que tienen longitudes de onda muy pequeñas. Sin embargo, a causa de la dualidad onda-partícula, el haz de rayos gamma que inciden en el neutrón actuaría como una serie de proyectiles fotónicos. Los rayos gamma tienen frecuencias muy altas y por ello cada fotón transporta una gran cantidad de energía. Cuando un pesado fotón alcanza al neutrón, le propinará una importante sacudida que alterará su velocidad. Por tanto, aunque conozca la posición del neutrón en ese instante, su velocidad cambiará de forma impredecible a causa del propio proceso de observación.

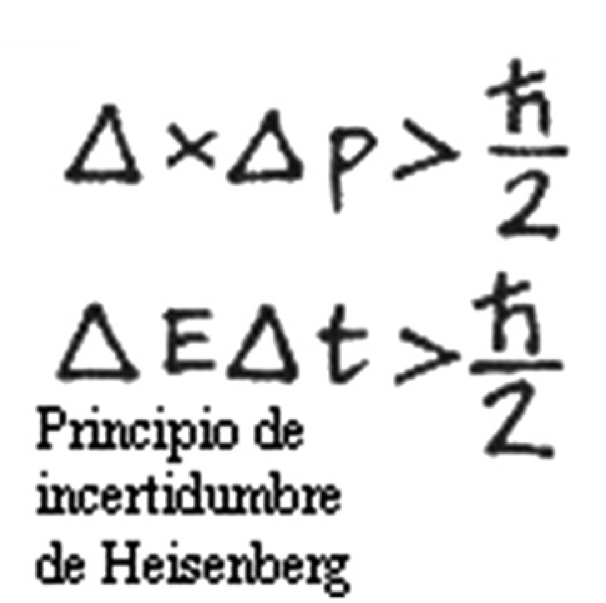
Si utilizara fotones más ligeros con energías menores para minimizar el cambio de velocidad, sus longitudes de onda serían más largas y también se degradaría la precisión con la que podríamos medir la posición. No importa cómo optimice el experimento: no se pueden conocer la posición y la velocidad de la partícula simultáneamente. Hay un límite fundamental expresado en el principio de incertidumbre de Heisenberg.

WERNER HEISENBERG (1901-1976)

Werner Heisenberg vivió en Alemania durante las dos guerras mundiales. Siendo un adolescente durante la primera guerra mundial, Heisenberg se unió al joven movimiento alemán militarizado que fomentaba la vida al aire libre y objetivos físicos. Heisenberg trabajó en granjas en verano, aprovechando el tiempo

para estudiar matemáticas. Estudió física teórica en la Universidad de Munich, aunque encontraba duro compaginar su amor por el campo y el mundo abstracto de la ciencia. Tras doctorarse, Heisenberg ocupó puestos académicos y conoció a Einstein durante una visita a Copenhague. En 1925, Heisenberg inventó la primera forma de mecánica cuántica, conocida como la mecánica de matrices, y recibió el Premio Nobel por este trabajo en 1932. Actualmente, se le conoce más por el principio de incertidumbre que formuló en 1927. Durante la segunda guerra mundial Heisenberg dirigió el fracasado proyecto armamentístico nuclear alemán y trabajó en un reactor de fisión nuclear. Es discutible si la incapacidad alemana para construir un arma nuclear fue deliberada o simplemente obedeció a la falta de recursos. Tras la guerra fue arrestado por los Aliados e internado junto con otros científicos en Inglaterra, antes de retornar posteriormente a la investigación en Alemania.

En realidad, lo que sucede es más difícil de comprender a causa del comportamiento dual onda-partícula, tanto de las partículas subatómicas como de las ondas electromagnéticas. Las definiciones de posición, momento, energía y tiempo de las partículas son todas probabilísticas.



Principio de incertidumbre de Heisenberg

La ecuación de Schrödinger describe la probabilidad de que una partícula se encuentre en un lugar determinado o tenga una energía determinada de acuerdo con la teoría cuántica, tal y como queda plasmado en la función de onda de la partícula que describe todas sus propiedades. Heisenberg trabajaba en la teoría cuántica, tal y como queda plasmado en la función de onda de la partícula que describe todas sus propiedades.

Heisenberg trabajaba en la teoría cuántica en la misma época que Schrödinger. Éste prefirió trabajar en los aspectos ondulatorios de los sistemas subatómicos, mientras que Heisenberg investigó la naturaleza escalonada de las energías. Ambos físicos desarrollaron formas de describir los sistemas cuánticos matemáticamente de acuerdo con sus propias tendencias; Schrödinger utilizó las matemáticas ondulatorias, y Heisenberg, las matriciales o las tablas numéricas de dos dimensiones, como forma para registrar los conjuntos de propiedades.

Las interpretaciones matricial y ondulatoria tenían sus seguidores y ambos bandos pensaban que el otro grupo estaba equivocado. Finalmente unieron sus recursos y propusieron una descripción conjunta de la teoría cuántica que se dio a conocer como mecánica cuántica. Al tratar de formular estas ecuaciones, Heisenberg observó las incertidumbres que no podían disiparse. Llamó la atención de un colega, Wolfgang Pauli, sobre éstas en una carta fechada en 1927.

Indeterminismo

Las profundas implicaciones del principio de incertidumbre no se perdieron con Heisenberg y él puso de manifiesto el desafío que suponían para la física convencional. En primer lugar, implicaban que el comportamiento pasado de una partícula subatómica no estaba restringido hasta que se medía. Según Heisenberg, «el camino sólo existe cuando lo contemplamos». No tenemos modo alguno de saber dónde está una cosa hasta que la medimos. También señaló que tampoco es posible predecir la trayectoria futura de una partícula. A causa de estas profundas incertidumbres sobre su posición y velocidad, el resultado futuro también era impredecible.

«Cuanto mayor es la precisión con la que se determina la posición, menor es la precisión con la que se conoce el momento en ese instante, y viceversa.»
Werner Heisenberg, 1927

Ambas afirmaciones provocaron una importante ruptura respecto a la física newtoniana de la época, la cual suponía que el mundo externo existía de forma independiente y que era cosa del observador de un experimento comprender la verdad subyacente. La mecánica cuántica mostró que a un nivel atómico, una perspectiva tan determinista carecía de significado y que sólo cabía hablar de

probabilidades de resultados. Ya no se hablaba de causa y efecto, sino sólo de posibilidad. Einstein y otros muchos lo encontraron difícil de aceptar, pero tuvieron que estar de acuerdo en que esto era lo que se desprendía de las ecuaciones. Por primera vez, la física sobrepasó la experiencia del laboratorio y penetró con firmeza en el reino de las matemáticas abstractas.

Cronología

1687 d. C.	Las leyes del movimiento de Newton implican un universo determinista.
1901 d. C.	La ley de Planck utiliza técnicas estadísticas.
1927 d. C.	Heisenberg publica su principio de incertidumbre.

La idea en síntesis: conoce tus límites.

27. La interpretación de Copenhague

Las ecuaciones de la mecánica cuántica dieron a los científicos las respuestas adecuadas, pero ¿cuál era su significado? El físico danés Niels Bohr desarrolló la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica, uniendo la ecuación de ondas de Schrödinger y el principio de incertidumbre de Heisenberg. Bohr argumentaba que un experimento aislado es algo que no existe, que las intervenciones del observador determinan los resultados de los experimentos cuánticos. Al hacerlo, puso en tela de juicio la propia objetividad de la ciencia.

En 1927, abundaban los puntos de vista opuestos sobre la mecánica cuántica. Erwin Schrödinger argumentaba que la física ondulatoria subyacía al comportamiento cuántico, el cual podía describirse mediante ecuaciones de ondas. Por su parte, Werner Heisenberg creía que la naturaleza de partícula de las ondas electromagnéticas y la materia, descrita en su representación matricial tabular, era de capital importancia para comprender la naturaleza. Heisenberg también había demostrado que nuestro conocimiento estaba fundamentalmente limitado por su principio de incertidumbre. Creía que tanto el pasado como el futuro eran imposibles de conocer hasta que fueran fijados por la observación, debido a la incertidumbre intrínseca de todos los parámetros que describían el movimiento de una partícula subatómica.

NIELS BOHR (1885-1962)

Niels Bohr vivió dos guerras mundiales y trabajó con algunos de los mejores físicos del mundo. El joven Niels estudió física en la Universidad de Copenhague, y llevó a cabo experimentos que le valieron algunos premios en el laboratorio de fisiología de su padre. Se trasladó a Inglaterra después de hacer el doctorado, pero chocó con J. J. Thomson. Después de trabajar con Ernest Rutherford en Manchester, regresó a Copenhague, y concluyó su trabajo sobre el

«modelo atómico de Bohr» (que continúa siendo como la mayoría de la gente representa el átomo actualmente). Obtuvo el Premio Nobel en 1922, justo antes de que la mecánica cuántica hiciera su aparición. Para escapar de la Alemania de Hitler en la década de 1930, los científicos se refugiaban en el Instituto de Física Teórica de Bohr en Copenhague, donde recibían cobijo en una mansión donada por Carlsberg, el cervecero danés. Cuando los nazis ocuparon Dinamarca en 1940, Bohr huyó en un bote de pesca hasta Suecia y luego a Inglaterra.

Otro hombre trató de reunir todos los experimentos y teorías para componer un nuevo panorama que pudiera explicar el conjunto. Fue Niels Bohr, el director del departamento de Heisenberg en la Universidad de Copenhague y el científico que había explicado los estados energéticos cuánticos de los electrones en el átomo de hidrógeno. Bohr, junto con Heisenberg, Max Born y otros desarrolló una concepción holística de la mecánica cuántica que se ha dado en llamar la interpretación de Copenhague. Continúa siendo la interpretación favorita de la mayoría de los físicos, aunque se han sugerido algunas variaciones.

Dos caras

Niels Bohr propuso una aproximación filosófica para sostener la nueva ciencia. En concreto, puso de relieve el impacto que los propios observadores tienen sobre los resultados de los experimentos cuánticos. En primer lugar, aceptaba la idea de «complementariedad», de que las vertientes de onda y partícula de la materia y de la luz eran dos caras del mismo fenómeno subyacente y no dos familias separadas de acontecimientos. Igual que las imágenes de un test psicológico pueden cambiar de apariencia dependiendo de cómo las miremos —dos líneas onduladas simétricas pueden parecer la silueta de un jarrón o dos caras mirándose una a otra—, las propiedades de onda y partícula eran formas complementarias de observar un mismo fenómeno. No era la luz la que cambiaba de carácter, sino más bien la forma en que decidíamos mirarla.

Para salvar el abismo entre sistemas cuánticos y normales, incluyendo nuestra

propia experiencia a escala humana, Bohr introdujo también el «principio de correspondencia», según el cual el comportamiento cuántico debe desaparecer de los sistemas más grandes con los que estamos familiarizados, cuando la física newtoniana es adecuada.

Imposible de conocer

Bohr se dio cuenta de la importancia capital del principio de incertidumbre, que afirma que no podemos medir al mismo tiempo la posición y el momento (o velocidad) de una partícula subatómica en un instante determinado. Si una de las cantidades se mide con exactitud, entonces la otra es intrínsecamente incierta. Heisenberg creyó que la incertidumbre procedía de la mecánica del propio acto de la medición. Para medir alguna cosa, incluso para observarla, primero debemos reflejar unos cuantos fotones de luz. Como esto siempre implica la transferencia de un cierto momento o energía, este acto de observación alteraba el movimiento original de la partícula.

«Estamos en una jungla y nos guiamos por medio del ensayo y el error, haciendo camino al avanzar.» Max Born, 1882-1970

Por otra parte, Bohr pensaba que la explicación de Heisenberg fallaba. Sostenía que nunca podemos separar por completo al observador del sistema que él o ella quieren medir. Era el propio acto de la observación el que determinaba el comportamiento final del sistema, a través del comportamiento probabilístico onda-partícula de la física cuántica, y no debido sólo a la transferencia de energía. Bohr creía que el comportamiento de un sistema completo tenía que ser considerado como una unidad; no se podía separar la partícula, ni el radar, ni siquiera al observador. Aunque miráramos una manzana, era necesario considerar las propiedades cuánticas del sistema en su conjunto, incluyendo el sistema visual de nuestro cerebro que procesa los fotones de la manzana.

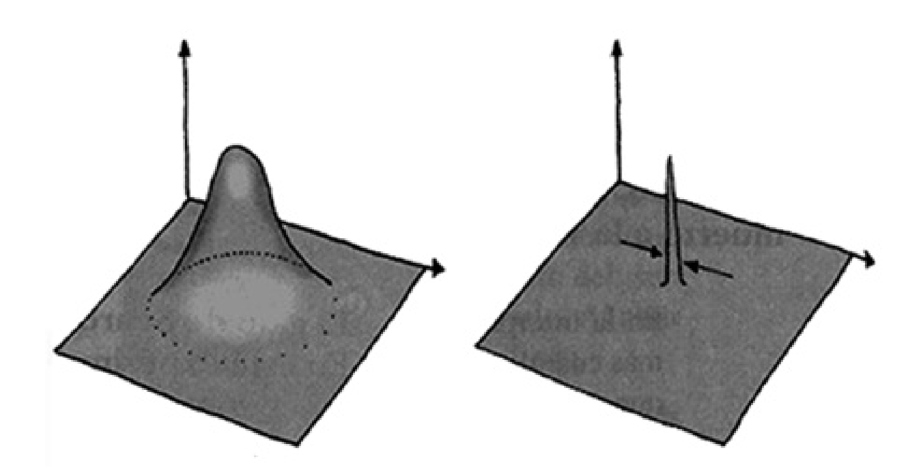
Bohr también aducía que el término «observador» es erróneo porque conjura la imagen de un testigo externo separado del mundo que se observa. Un fotógrafo como Ansel Adams puede capturar la belleza natural del Parque Nacional de Yosemite, pero ¿realmente no ha sido tocado por el hombre? ¿Cómo puede ser si el

propio fotógrafo está allí también? La imagen real es la de un hombre plantado en medio de aquel paraje natural, y no separado de él. Para Bohr, el observador constituía una importante parte del experimento.

Este concepto de la participación del observador resultaba sorprendente para los físicos porque cuestionaba la propia forma en que la ciencia siempre se había desarrollado y el concepto fundamental de la objetividad científica. Los filósofos también se resistían. La naturaleza ya no era mecánica y predecible, sino que, en el fondo, era intrínsecamente imposible de conocer. ¿Qué significaba esto para los conceptos de verdad fundamental, y no digamos para ideas simples como las de pasado y futuro? Einstein, Schrödinger y otros tenían dificultades para abandonar sus firmes convicciones de un universo externo, determinista y verificable. Einstein creía que, como sólo se podía describir por medio de estadísticas, la teoría de la mecánica cuántica tenía que ser cuando menos incompleta.

Funciones de onda colapsadas

Dado que observamos las partículas subatómicas, y las ondas como una u otra entidad, ¿qué decide cómo se manifiestan? ¿Por qué la luz que pasa por dos rendijas interfiere como ondas el lunes, pero cambia su comportamiento como partícula el martes si tratamos de capturar el fotón al pasar por una rendija?



Según Bohr y los partidarios de la interpretación de Copenhague, la luz existe simultáneamente en ambos estados, como onda y como partícula. Sólo adopta la apariencia de una u otra cuando es medida. Así que escogemos por adelantado

cómo se presentará al decidir cómo nos gustaría medirla.

En este punto de la toma de decisión, cuando se fija el carácter de partícula u onda, decimos que la función de onda se ha colapsado. Todas las probabilidades de resultados contenidos en la descripción de la función de onda de Schrödinger se vienen abajo de manera que se pierde todo salvo el resultado final. Por lo tanto, según Bohr, la función de onda original de un haz de luz contiene en su interior todas las posibilidades, si la luz aparece en su faceta de onda o de partícula. Cuando la medimos, aparece de una forma, no porque cambie de un tipo o sustancia a otro, sino porque es verdaderamente ambas a un tiempo. Las manzanas y naranjas cuánticas tampoco son dos cosas distintas, sino que son un híbrido.

«Quien no se sienta conmocionado ante la teoría cuántica es que no la ha entendido.» Niels Bohr, 1885-1962

Algunos físicos todavía tienen problemas para comprender intuitivamente lo que significa la mecánica cuántica, y otros los tienen desde que Bohr ofreció nuevas formas de interpretarla. Bohr argumentó que es necesario volver a empezar otra vez para comprender el mundo cuántico y que no podemos utilizar conceptos ordinarios de la vida cotidiana. El mundo cuántico es algo extraño y desconocido, y tenemos que aceptarlo.

Cronología

1901 d. C.	Planck publica su ley de la radiación de los cuerpos negros.
1905 d. C.	Einstein utiliza los cuantos de luz para explicar el efecto fotoeléctrico.
1927 d. C.	Heisenberg publica su principio de incertidumbre. Se formula la interpretación de Copenhague.

La idea en síntesis: usted escoge

28. El gato de Schrödinger

El gato de Schrödinger está vivo y muerto al mismo tiempo. En este experimento hipotético, un gato que se encuentra en el interior de una caja puede haber muerto o no por el efecto de una cápsula de veneno, dependiendo de un disparador aleatorio. Erwin Schrödinger utilizó esta metáfora para demostrar lo ridícula que le parecía la interpretación de Copenhague de la teoría cuántica, la cual predicaba que, hasta que no se observaba realmente el resultado, el gato se encontraba en un estado incierto, vivo y muerto a la vez.

En la interpretación de Copenhague de la teoría cuántica, los sistemas cuánticos existen en forma de una nube de probabilidades hasta que un observador gira el interruptor y selecciona un resultado para su experimento. Antes de ser observado, el sistema adopta todas las posibilidades. La luz es a un tiempo partícula y onda hasta que decidamos cuál de las dos formas queremos medir; entonces adopta esa forma.

Aunque una nube de probabilidades puede parecer un concepto plausible para una cantidad abstracta como un fotón u onda lumínica, ¿qué podría significar para algo más grande que pudiéramos conocer? ¿Cuál es realmente la naturaleza de esta imprecisión cuántica?

En 1935, Erwin Schrödinger publicó un artículo que contenía un experimento hipotético que trataba de ilustrar este comportamiento con un ejemplo más colorido y familiar que las partículas subatómicas. Schrödinger era sumamente crítico con la opinión de Copenhague de que el acto de la observación influía en este comportamiento. Quería hacer evidente lo ridícula que era la interpretación de Copenhague.

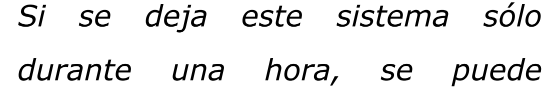
Incertidumbre cuántica

Schrödinger planteó la siguiente situación, que era completamente imaginaria. Ningún animal resultó herido.

«Se encierra a un gato en una caja de metal, junto con el siguiente

dispositivo diabólico (que debe asegurarse frente a la interferencia directa del gato): en un contador Geiger se introduce una pequeña dosis de una sustancia radiactiva, tan minúscula que quizá en el curso de una hora uno de sus átomos se habrá desintegrado, aunque también, con igual probabilidad, quizá ninguno; si esto sucede, el contador descarga un martillo que rompe la botella de vidrio de ácido cianhídrico





Si se deja este sistema sólo durante una hora, se puede afirmar que el gato seguirá vivo si ningún átomo se ha desintegrado. La primera desintegración atómica lo habría envenenado.»

Así que hay un 50% de probabilidades de que el gato esté vivo (con suerte) o muerto al abrir la caja transcurrido ese tiempo. Schrödinger argumentaba que, siguiendo la lógica de la interpretación de Copenhague, tendríamos que pensar que el gato existe en una confusa mezcla de estados, estando vivo y muerto al mismo tiempo, mientras la caja siguiera cerrada. Igual que la apariencia de onda o partícula de un electrón sólo está fijada en el punto de detección, el futuro del gato sólo se determinará cuando decidamos abrir la caja y mirarlo. Al abrir la caja realizamos una observación y se determina el resultado.

Schrödinger se quejaba de que, sin duda, esto era ridículo y aún más cuando se refería a un animal de verdad como un gato. A partir de nuestra experiencia cotidiana sabemos que el gato tiene que estar vivo o muerto y no una mezcla de ambas cosas, y es una locura imaginar que estaba en algún estado de incertidumbre sólo porque no estábamos mirando. Si el gato vivía, todo cuanto iba a recordar era haber estado dentro de una caja vivito y coleando, y no ser una nube de probabilidades o una función de onda.

Entre otros, Einstein convino con Schrödinger en que la visión de Copenhague era absurda. Juntos plantearon nuevas cuestiones. Como animal que era, ¿era capaz el gato de observarse y colapsar así su propia función de onda? ¿Qué supone ser un observador? El observador, ¿tiene que ser un ser consciente como un humano o sirve un animal? ¿Y una bacteria?

Si vamos un poco más lejos, podríamos preguntar si hay en el mundo alguna cosa que exista independientemente de nuestra observación de ella. Si ignoramos al gato de la caja y nos limitamos a pensar en la desintegración de la partícula radiactiva, ¿se habrá desintegrado o no si mantenemos la caja cerrada? ¿O estará en la incertidumbre cuántica hasta que abramos la tapa de la caja, como requiere la interpretación de Copenhague? Quizá el mundo entero está en un estado de confusión y nada se resuelve hasta que lo observamos, haciendo que la función de onda se colapse cuando lo hacemos. ¿Se desintegra su lugar de trabajo cuando usted está ausente durante los fines de semana, o está protegido por la mirada de los transeúntes? Si nadie la mira, ¿deja de existir su cabaña del bosque en la realidad? ¿O permanece en una mezcla de estados de probabilidad, como una superposición de haberse incendiado, haberse inundado, haber sido invadida por las hormigas o los osos, o está allí tan tranquilamente esperando a que usted vuelva? ¿Cuentan como observadores los pájaros y ardillas? Por extraño que parezca, así es como la interpretación de Copenhague de Bohr explica el mundo a escala atómica.

ERWIN SCHRÖDINGER (1887-1961)

El físico austríaco Erwin Schrödinger estudió la mecánica cuántica y trató (sin éxito), junto con Einstein, de unificar la gravedad y la mecánica cuántica en una única teoría. Propició las interpretaciones de ondas y le desagradaba la dualidad onda-partícula, que le condujo al conflicto con otros físicos. Cuando era un niño, Schrödinger adoraba la poesía alemana, pero sin embargo decidió estudiar física teórica en la universidad. Schrödinger sirvió en el frente italiano durante la primera guerra mundial, continuó su trabajo a distancia e incluso publicó algunos artículos, regresando posteriormente al mundo académico. Schrödinger propuso su

ecuación de ondas en 1926, por la cual recibió el Premio Nobel junto con Paul Dirac en 1933. Schrödinger se trasladó después a Berlín para dirigir el viejo departamento de Max Planck, pero con la llegada de Hitler al poder en 1933 decidió abandonar Alemania. Le costó volver a establecerse y trabajó durante algunos períodos en Oxford, Princeton y Graz. Con la anexión de Austria en 1938, huyó de nuevo, trasladándose finalmente a un puesto creado a medida para él en el nuevo Instituto de Estudios Avanzados en Dublín, Irlanda, donde permaneció hasta que se retiró a Viena. La vida personal de Schrödinger fue tan complicada como su vida profesional; tuvo hijos con varias mujeres, uno de los cuales vivió con él y su mujer durante un tiempo en Oxford.

Universos paralelos

El problema filosófico de cómo las observaciones deciden los resultados ha conducido a otra variación de la interpretación de la teoría cuántica: la hipótesis de los universos paralelos. Sugerida en 1957 por Hugh Everett, esta perspectiva alternativa evita la indeterminación de las funciones de onda inobservadas diciendo en cambio que hay un número infinito de universos paralelos. Cada vez que se realiza una observación y se registra un resultado específico, se escinde un nuevo universo. Cada universo es exactamente igual al otro, aparte de la única cosa cuyo cambio se ha observado. Por tanto, las probabilidades son las mismas, pero el desarrollo de los acontecimientos nos hace avanzar a través de una serie de universos que se bifurcan.



En una interpretación de universos paralelos del experimento del gato de Schrödinger, cuando se abre la caja el gato ya no está en una superposición de todos los estados posibles. En lugar de eso, está vivo en un universo o muerto en otro paralelo. En un universo el veneno se libera, en el otro no.

Es discutible si esto es una mejora respecto a estar en la indeterminación de una función de onda. Podemos muy bien evitar la necesidad de que un observador nos impida a veces ser sólo una nube de probabilidades, pero el coste es invocar a toda una variedad de universos alternativos en los que las cosas son ligeramente diferentes. En un universo soy una estrella del rock, en otro no soy más que un músico callejero. O en uno llevo calcetines negros, en el otro grises. Esto parece un despilfarro de múltiples universos aceptables (y apunta a un universo en el que la gente tiene un vestuario muy llamativo). Otros universos alternativos pueden ser más significativos: en un Elvis todavía está vivo, en otro John F. Kennedy no recibió un disparo, en otro Al Gore era presidente de EE. UU. Esta idea se ha tomado prestada en numerosas ocasiones como trama argumental en películas tales como *Dos vidas en un instante*, donde Gwyneth Paltrow vive dos vidas paralelas en Londres, una de éxito y la otra no.

Actualmente, algunos físicos argumentan que la idea de Schrödinger sobre su metafórico experimento del gato no era válida. Igual que sucede con su teoría exclusivamente basada en las ondas, trataba de aplicar las ideas físicas familiares al extraño mundo cuántico, cuando lo único que tenemos que aceptar es que es verdaderamente extraño.

Cronología

1927 d. C.	Interpretación de Copenhague.
1935 d. C.	Schrödinger propone su experimento del gato cuántico.
1957 d. C.	Everett sugiere la hipótesis de los universos paralelos.

La idea en síntesis: ¿vivo o muerto?

29. La paradoja EPR

La mecánica cuántica sugiere que la información puede ser transmitida de forma instantánea entre sistemas, al margen de lo lejos que estén. Este entrelazamiento implica vastas redes de interconectividad entre las partículas del universo. Einstein, Podolsky y Rosen pensaron que esto era absurdo y cuestionaron esta interpretación en su paradoja. Los experimentos mostraban que el entrelazamiento cuántico es cierto, permitiendo aplicaciones en criptografía, computación e incluso teletransportación cuántica.

Albert Einstein jamás aceptó la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica, que afirmaba que los sistemas cuánticos existían en un incierto estado probabilístico hasta que eran observados, y entonces adoptaban su estado final. Antes de ser filtrado por la observación, el sistema existe en una combinación de todos los estados de existencia posibles. Einstein no estaba satisfecho con esta representación, argumentando que una combinación así era poco realista.

«Sea como fuere, yo estoy convencido de que Él [Dios] no juega a los dados.»
Albert Einstein, 1926

Partículas paradójicas

En 1935, Einstein junto con Boris Podolsky y Nathan Rosen resumieron su descontento en forma de una paradoja. Ésta se dio a conocer como paradoja Einstein-Podolsky-Rosen o EPR. Imaginemos una partícula que se descompone en dos más pequeñas. Si la partícula madre original era estacionaria, las partículas hijas tenían que tener un momento lineal y angular igual y opuesto, de tal modo que la suma fuera cero (ya que éstos se conservan). Por tanto, las partículas emergentes tienen que dispersarse y girar en sentidos opuestos. Otras propiedades cuánticas del par están unidas de forma similar. Una vez emitidas, si tuviéramos que medir la dirección del espín de una de las partículas, sabríamos inmediatamente que el otro miembro del par tiene el espín contrario, aunque haya transcurrido un tiempo significativo y estuviera lejos o fuera de su alcance. Es como

mirar a unos gemelos y observar el color de sus ojos. Si son verdes, en ese preciso instante sabemos que el otro gemelo también los tiene verdes.

Teletransportación

La teletransportación es un recurso ampliamente utilizado en la ciencia ficción. Los comienzos de las tecnologías de la comunicación como el telégrafo en el siglo XIX, planearon la posibilidad de transferir información diferente de los pulsos eléctricos a largas distancias. En las décadas de 1920 y 1930, la teletransportación hizo su aparición en la literatura, por ejemplo, en las obras de Arthur Conan Doyle, y se convirtió en un producto básico de las historias de ciencia ficción. La teletransportación realmente despegó con la serie televisiva de culto Star Trek, que incluía la famosa frase Beam me up, Scottie! (¡Teletranspórtame, Scottie!). El teletransportador de la nave Enterprise desintegra al teletransportado átomo a átomo y lo vuelve a montar perfectamente. En la vida real, la teletransportación se considera imposible debido al principio de incertidumbre de Heisenberg. Aunque es imposible transmitir átomos reales, el entrelazamiento cuántico permite la transmisión de información a larga distancia, pero hasta la fecha esto sólo ha funcionado con partícula diminutas.

Al explicar esto utilizando la interpretación de Copenhague, se diría que, anges de realizar cualquier medición, ambas partículas (los gemelos) existían en una superposición de ambos estados. Las funciones de onda de las partículas incluían información sobre éstas girando en cualquier dirección; los gemelos tendrían una mezcla de todos los colores de ojos posibles. Cuando medimos a un miembro del par, las funciones de onda para ambos tienen que colapsarse al mismo tiempo. Einstein, Podolsky y Rosen argumentaban que esto carecía de sentido. ¿Cómo puede usted afectar a una partícula en un instante en que podría estar potencialmente alejada de su compañera? Einstein ya había demostrado que la velocidad de la luz era el límite de la velocidad universal; nada podía viajar más

rápido. ¿Cómo se comunicaba el hecho de la observación de la primera partícula a la segunda? Que una medición en un lado del universo podía afectar «simultáneamente» a una materia que se encontraba en el lado opuesto debía significar que la mecánica cuántica estaba equivocada.

Entrelazado

En el mismo trabajo en el que describía su paradoja del gato, Schrödinger utilizaba el término «entrelazado» para describir esta extraña acción a distancia.

A Bohr era inevitable que el universo estuviera vinculado a nivel cuántico. Pero Einstein prefería creer en una «realidad local» donde el conocimiento del mundo era cierto localmente. Igual que los gemelos habían nacido presumiblemente con el mismo color de ojos y no andaban por ahí en un confuso estado de ojos multicolores hasta que los observábamos, Einstein supuso que el par de partículas era emitido de una u otra forma que se fijaba posteriormente; no era necesaria ninguna comunicación a distancia, ni ningún papel para el observador. Einstein presupuso que se descubrirían ciertas variables ocultas, actualmente reformuladas como «desigualdades de Bell», que finalmente demostraron que estaba en lo cierto, pero no se ha hallado ninguna evidencia que respalde esta idea.

La idea de Einstein de una realidad local ha resultado ser falsa. Los experimentos han demostrado incluso que el entrelazamiento cuántico es cierto, incluso si hay más de dos partículas y para partículas entrelazadas separadas por muchos kilómetros.

Información cuántica El entrelazamiento cuántico se inició originalmente como un debate filosófico, pero en la actualidad permite la codificación y transmisión de información de formas diferentes de las que anteriormente eran posibles. En los ordenadores corrientes, la información está codificada como bits con valores fijos en código binario. En la codificación cuántica, se utilizan dos o más estados cuánticos, pero el sistema también puede existir en una combinación de estos estados. En 1993, se acuñó el término «qubit» como forma abreviada para designar el bit cuántico (la mezcla cuántica de valores del bit) y en la actualidad las computadoras cuánticas de valores del bit) y en la actualidad las computadoras cuánticas se diseñan de acuerdo con estos principios.

Los estados de entrelazamiento ofrecen nuevos vínculos comunicativos entre los qubits. Si se produce una medición, ésta inicia una cascada de nuevas comunicaciones cuánticas entre los elementos del sistema. La medición de un elemento determina los valores de todos los demás; estos efectos son muy útiles en criptografía cuántica e incluso en teletransportación cuántica.

«Por lo tanto, parece que incluso Dios está limitado por el principio de incertidumbre y no puede conocer la posición y la velocidad de una partícula al mismo tiempo. Entonces, ¿juega Dios a los dados con el universo? Toda la evidencia lo señala como un jugador empedernido, que tira los dados siempre que tiene ocasión.» Stephen Hawking, 1993

La indeterminación de la mecánica cuántica en realidad hace imposible nuestra teletransportación tal y como la representan en la ciencia ficción, a través de la cual un científico toma toda la información de algo y lo transporta a otro sitio. No podemos obtener la totalidad de la información a causa del principio de incertidumbre. Por tanto, teletransportar a un ser humano o una mosca siquiera, es imposible. Sin embargo, es posible una versión cuántica a base de manipular sistemas entrelazados. Si dos personas, a las que los físicos llaman Alice y Bob, comparten un par de fotones entrelazados. Alice puede realizar mediciones de su fotón de tal forma que puede transmitir toda la información original al fotón entrelazado de Bob. Entonces el fotón de Bob no se podrá distinguir del original de ella, aunque es una reproducción. Cabe preguntarse si esto es o no verdadera teletransportación. Ningún fotón o información ha viajado a ninguna parte, así que Alice y Bob podrían estar en lados opuestos del universo y aun así transformar sus fotones entrelazados.

La criptografía cuántica se basa en el uso del entrelazamiento cuántico como clave de codificación vinculante. El emisor y el receptor tienen que conocer cada uno por su cuenta los componentes de un sistema entrelazado. Un mensaje se puede codificar al azar y el único código para desentrañarlo se envía al receptor a través de conexiones de entrelazamientos cuánticos. Esto tiene la ventaja de que si el mensaje es interceptado, cualquier medición arruina el mensaje (cambiando su estado cuántico), de modo que éste sólo se puede utilizar una vez y sólo puede ser leído por alguien que conozca exactamente las mediciones cuánticas que hay que

llevar a cabo para desvelarlo a través de la clave.

El entrelazamiento nos dice que es sencillamente erróneo suponer que todo nuestro mundo existe independientemente en una forma, al margen de las mediciones que hagamos de él. No existe un objeto fijo en el espacio, sólo información. Sólo podemos recopilar información acerca de nuestro mundo y ordenarlo como consideremos aceptable, de tal modo que tenga sentido para nosotros. El universo es un mar de información; la forma que le asignemos es secundaria.

Cronología

1927 d. C.	Se propone la interpretación de Copenhague.
1935 d. C.	Einstein, Podolsky y Rosen formulan su paradoja.
1964 d. C.	John Bell descubre desigualdades para una realidad local.
1981-1982 d. C.	Se demuestra que las desigualdades de Bell se pueden contravenir, lo cual apoya el entrelazamiento.
1993 d. C.	Los bits cuánticos se bautiza como qubits.

La idea en síntesis: mensajería instantánea

30. El principio de exclusión de Pauli

El principio de exclusión de Pauli explica por qué la materia es rígida e impermeable, por qué no nos hundimos en el suelo, ni podemos pasar la mano a través de una mesa. También es el responsable de la existencia de estrellas de neutrones y enanas blancas. Las reglas de Wolfgang Pauli se aplican a los electrones, protones y neutrones, y por tanto, afectan a toda la materia. El principio afirma que ninguna de estas partículas puede tener el mismo conjunto de números cuánticos simultáneamente.

¿Qué confiere rigidez a la materia? Los átomos son en su mayor parte espacio vacío, así que ¿por qué no podemos exprimirlos como una esponja o empujar los materiales unos a través de otros como queso a través de un rallador? La cuestión de por qué la materia habita en el espacio es una de las más profundas en física. Si no fuera verdad, podríamos caer en el centro de la Tierra o hundirnos en el suelo, y los edificios se derrumbarían por su propio peso.

No es lo mismo

El principio de exclusión de Pauli, diseñado por Wolfgang Pauli en 1925, explica por qué los átomos normales no pueden coexistir en la misma región del espacio. Pauli sugirió que el comportamiento cuántico de los átomos y las partículas significaba que tenían que seguir ciertas reglas que les impedían tener la misma función de onda o, de forma equivalente, las mismas propiedades cuánticas. Pauli diseñó su principio para tratar de explicar el comportamiento de los electrones en los átomos. Se sabía que los electrones preferían ciertos estados energéticos u orbitales alrededor del núcleo. Pero los electrones están diseminados entre estos orbitales y nunca se reúnen todos en el orbital de más baja energía. Parecían ocupar los orbitales de acuerdo con unas reglas elaboradas por Pauli.

Igual que la física de Newton está expresada en términos de fuerza, momento y energía, la mecánica cuántica tiene su propio conjunto de parámetros. Por ejemplo, el espín cuántico es análogo al momento angular, pero está cuantizado y sólo

adopta ciertos valores. Al resolver la ecuación de Schrödinger, para describir cualquier partícula se necesitan cuatro números cuánticos: tres coordenadas espaciales y la cuarta, el espín. Las reglas de Pauli establecían que dos electrones de un mismo átomo no podían estar en el mismo sitio con las mismas propiedades al mismo tiempo. Por tanto, a medida que el número de electrones del átomo aumenta, por ejemplo, cuando el átomo se hace más pesado, los electrones llenan sus espacios asignados y gradualmente se desplazan hacia orbitales cada vez más alejados. Es como los asientos de un pequeño teatro, que se van llenando desde el escenario hacia atrás.

Fermiones

Las reglas de Pauli se aplican a todos los electrones y a otras partículas cuyo espín cuántico viene expresado en múltiplos de valores de media unidad básica, incluyendo el protón y el neutrón. Estas partículas se denominan «fermiones» por el físico italiano Enrico Fermi. Los fermiones tienen funciones de onda asimétricas, que cambian de positivo a negativo, como queda expresado por la ecuación de Schrödinger. El espín también tiene una dirección, así que los fermiones pueden estar uno junto a otro si poseen un espín opuesto. Dos electrones pueden ocupar el estado de energía más bajo de un átomo, pero sólo si sus espines no están alineados.

Como los bloques constituyentes básicos de la materia, los electrones, protones y neutrones, son todos fermiones, el principio de exclusión de Pauli dicta el comportamiento de los átomos. Como ninguna de estas partículas puede compartir su estado de energía cuántica con ninguna otra, los átomos son intrínsecamente rígidos. Los electrones distribuidos en muchos orbitales energéticos no se pueden aglomerar en el orbital más cercano al núcleo; de hecho, se resisten a ser comprimidos ejerciendo una gran presión. De modo que dos fermiones no pueden ocupar la misma butaca del teatro.

WOLFGANG PAULI (1900-1959)

Wolfgang Pauli es conocido sobre todo por su principio de exclusión y por proponer la existencia del neutrino. Pauli fue un estudiante

precoz en Austria, que leyó los trabajos de Einstein y escribió artículos sobre la relatividad. Heisenberg describió a Pauli como un ave nocturna que trabajaba en los cafés y raramente asistía a las clases matinales. Pauli sufrió numerosos problemas personales, incluyendo el suicidio de su madre, un breve matrimonio fallido y un problema con la bebida. Buscando ayuda, consultó con el psicólogo suizo Carl Jung, quien recopiló miles de sueños de Pauli. La vida de Pauli mejoró cuando volvió a casarse, pero entonces llegó la segunda guerra mundial. Desde los Estados Unidos trabajó para mantener viva la ciencia europea. Regresó a Zurich después de la guerra y recibió el Premio Noble en 1945. En años posteriores, se ocupó de los aspectos más filosóficos de la mecánica cuántica y sus paralelos en psicología.

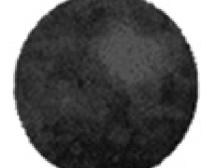
Degeneración cuántica

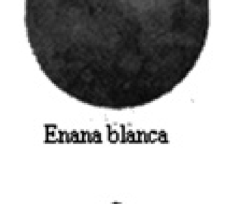
Las estrellas de neutrones y las enanas blancas deben su propia existencia al principio de exclusión de Pauli. Cuando una estrella llega al final de su vida y ya no puede quemar combustible, se desintegra. Su enorme gravedad atrae todas las capas del gas hacia el interior. Cuando se colapsa, una parte del gas puede dispararse (como en la explosión de una supernova), pero las brasas restantes se contraen aún más. Cuando los átomos se comprimen, los electrones tratan de resistirse a la compactación. Se encuentran en los orbitales energéticos más internos posibles sin contravenir el principio de Pauli, sosteniendo a la estrella únicamente con esta «presión degenerativa». Las enanas blancas son estrellas que tienen aproximadamente la misma masa que el Sol, comprimida en una región de un radio similar al de la Tierra. Son tan densas que el equivalente a un terrón de azúcar de materia de una enana blanca pesa una tonelada.

En las estrellas con una gravedad propia mayor, especialmente las estrellas con una masa 1,4 veces superior a la del Sol (lo que se denomina límite de masa de Chandrasekhar), la compactación no acaba aquí. En un segundo proceso, los protones y electrones pueden fundirse para formar neutrones, de modo que la estrella gigante se reduce a una apretada bola de neutrones.

Como antes, debido a que los neutrones son fermiones, no pueden tener el mismo estado cuántico. La presión de degeneración nuevamente sostiene a la estrella, pero esta vez está confinada en un radio de sólo diez kilómetros aproximadamente, comprimiendo toda la masa del Sol, o de varios soles, en un área equivalente a Manhattan. Las estrellas de neutrones son tan densas que un bloque del tamaño de un terrón de azúcar pesaría más de cien millones de toneladas. En el supuesto de que la gravedad exceda incluso esto, como ocurre con las estrellas más grandes, una nueva compactación acaba produciendo finalmente un agujero negro.


Tierra


Enana blanca


Estrella de neutrones

Bosones

Las reglas de Pauli sólo se aplican a los fermiones. Las partículas con múltiplos enteros de la unidad básica de espín y funciones de onda simétricas se denominan «bosones» por el físico indio Satyendranath Bose.

Los bosones incluyen partículas asociadas con las fuerzas fundamentales, como los protones, y algunos núcleos simétricos como el del helio (que contiene dos protones y dos neutrones).

«La cuestión de por qué todos los electrones de un átomo en su estado fundamental no estaban limitados en el orbital más interno ya había sido puesta de relieve por Bohr como problema fundamental... la mecánica clásica no podía ofrecer ninguna explicación a este fenómeno.»
Wolfgang Pauli, 1945

Cualquier cantidad de bosones pueden ocupar el mismo estado cuántico y esto puede desembocar en un comportamiento de grupo coordinado. Un ejemplo es el láser, según el cual muchos fotones de un solo color actúan conjuntamente.

Originalmente una extensión de la representación atómica de Bohr, el principio de exclusión de Pauli tan sólo precedió al principal avance de la teoría cuántica defendido por Heisenberg y

Schrödinger.

Pero es fundamental para el estudio del mundo atómico y, a diferencia de gran parte de la mecánica cuántica, tiene consecuencias que podemos tocar realmente.

Cronología

1925 d. C.	Pauli propone su principio de exclusión.
1933 d. C.	Se descubre el neutrón y se predicen las estrellas de neutrones.
1967 d. C.	Se detecta el primer pulsar, un tipo de estrella de neutrones.

La idea en síntesis: ¿está ocupado este asiento?

31. Superconductividad

A temperaturas muy bajas, algunos metales y aleaciones conducen la electricidad sin ofrecer ninguna resistencia. La corriente en estos superconductores puede fluir durante miles de millones de años sin pérdida de energía. A medida que los electrones se emparejan y se mueven todos juntos, evitando las colisiones que provoca la resistencia eléctrica, se aproximan a un estado de movimiento continuo.

Cuando se enfría a unos cuantos grados por encima del cero absoluto, el mercurio conduce la electricidad sin ningún tipo de resistencia. Esto fue descubierto en 1911 por el físico holandés Heike Onnes, cuando vertió mercurio en helio líquido a una temperatura de 4,2 k (grados por encima del cero absoluto). Al no ofrecer resistencia a la corriente, se detectó el primer material superconductor. Al cabo de poco, se observó un comportamiento similar en otros metales fríos incluido el plomo y en compuestos tales como el nitruro de niobio. Toda resistencia desaparecería por debajo de una cierta temperatura crítica que variaba según los materiales.

Movimiento continuo

Una consecuencia de la resistencia cero es que si ponemos en circulación una corriente por un superconductor ésta puede fluir para siempre. En el laboratorio, las corrientes se han logrado mantener durante muchos años y los físicos estiman que una corriente así se prolongaría durante miles de millones de años antes de perder energía. Es lo máximo que se han aproximado los científicos al movimiento continuo.

Pensamiento de grupo

Los físicos se sorprendieron al comprobar que una transición de tal magnitud podía producirse a bajas temperaturas. La temperatura crítica indicaba una rápida transición de fase, así que los físicos se fijaron en el comportamiento cuántico de

los electrones en un metal. La mecánica cuántica ofrecía algunas claves y en la década de 1950 se expusieron varias ideas. En 1957, los físicos norteamericanos John Bardeen, Leon Cooper y John Schrieffer propusieron una explicación completa y convincente de la superconductividad en los metales y las aleaciones simples que actualmente se denomina teoría BCS. Ésta sugería que la superconductividad se produce a causa del extraño comportamiento de los electrones cuando se unen formando parejas.

Superfluidos

Los superfluidos son fluidos que carecen de viscosidad, de modo que pueden fluir por una tubería interminable sin ninguna fricción. La superfluidez se conoce desde los años treinta. Un ejemplo es el helio-4 superenfriado (peso atómico 4, compuesto por dos protones, dos neutrones y dos electrones). Los átomos del helio-4 son bosones, formados por pares de fermiones. Los superfluidos se comportan de forma muy extraña cuando se colocan en un recipiente: fluyen formando una capa del espesor de un átomo en la parte superior del recipiente. Se puede crear una fuente si se inserta y se calienta un tubo capilar porque el superfluido no puede mantener un gradiente de temperatura (tiene conductividad térmica infinita) y el calor provoca de inmediato un cambio de presión. Si tratamos de girar un cubo de superfluido (véase Tema 1), ocurre algo muy extraño. Como no tiene viscosidad, el fluido no comienza a girar inmediatamente, sino que permanece en reposo. Si giramos el cubo con mayor rapidez, en algún punto crítico el superfluido comienza repentinamente a girar. Su velocidad está cuantizada —el superfluido sólo gira a ciertos valores.

Las parejas de electrones, llamadas pares de Cooper, interactúan con el entramado de átomos del metal por medio de las vibraciones que los unen. Un metal es una red de núcleos cargados positivamente en la cual flota libremente un «mar» de electrones. Si el metal está muy frío y la red está en calma, cuando pasa un

electrón cargado negativamente distorsiona ligeramente los puntos positivos de la red y los arrastra hacia fuera formando un bucle similar a una onda. Otro electrón que se mueva cerca puede ser atraído a esta zona de una carga positiva más intensa y ambos electrones se emparejan. El segundo electrón sigue al primero a todas partes. Esto sucede en todo el metal y muchos pares sincronizados de electrones se unen en un patrón de ondas en movimiento.

Condensados de Bose-Einstein

A muy bajas temperaturas, los grupos de bosones se comportan de forma muy extraña. Cerca del cero absoluto, muchos bosones pueden encontrarse en el mismo estado cuántico, haciendo visible el comportamiento cuántico a escalas mucho mayores. Predicho por Albert Einstein y basado en las ideas de Bose, los llamados condensados de Bose-Einstein no fueron creados en un laboratorio hasta 1995. Eric Cornell y Carl Wieman, de la Universidad de Colorado, y un poco más tarde Wolfgang Ketterle del MIT, observaron este comportamiento en un gas de átomos de rubidio que se había enfriado a 170.000 millonésimas de kelvin. En los condensados de Bose-Einstein, todos los átomos arracimados tienen la misma velocidad, ensombrecida tan sólo por el principio de incertidumbre de Heisenberg. Los condensados de Bose-Einstein se comportan como superfluidos. Los bosones pueden compartir estados cuánticos entre sí. Einstein especuló con la idea de que al enfriar bosones por debajo de una temperatura crítica, esto les haría caer (o «condensarse») en el estado cuántico de mínima energía, siendo el resultado una nueva forma de materia. Los condensados de Bose-Einstein se alteran con una gran facilidad, por lo que aún es pronto para aplicaciones prácticas.

Un solo electrón tiene que seguir el principio de exclusión de Pauli, que prohíbe que esas partículas con funciones de onda asimétricas (fermiones) compartan el mismo estado cuántico. Por consiguiente, cuando hay muchos electrones, si se encuentran

en la misma zona, tienen que tener una energía diferente entre sí. Pero cuando los electrones se emparejan y se comportan como una única partícula, ya no siguen este comportamiento. Su función de onda general pasa a ser simétrica y juntos ya no son fermiones, sino bosones. Y como bosones, los pares de electrones pueden compartir la misma energía mínima. Como resultado aparecen conjuntos de pares que tienen una energía general ligeramente inferior a la de los electrones libres en el metal. Es esta diferencia de energía la que provoca una rápida transición de propiedades a la temperatura crítica.

Cuando la energía calorífica de la red es menor que su descenso de energía, observamos un flujo continuo de pares de electrones unido a las vibraciones de la red que caracteriza la superconductividad. Como las ondas de la red dirigen los movimientos a largas distancias por ésta, no hay resistencia: todos los pares de electrones se mueven unos respecto a otros. Evitando las colisiones con los átomos inmóviles de la red, los pares de electrones actúan como un superfluido que puede circular libremente. A temperaturas más cálidas, los pares de Cooper se quiebran y pierden sus propiedades de bosón. Los electrones pueden colisionar con los iones de la red, que ahora están calientes y vibran creando una resistencia eléctrica. La rápida transición intercambia los estados cuando los electrones cambian de flujos de bosones coordinados a fermiones erráticos o viceversa.

Superconductores de alta temperatura

En la década de 1980, la superconductividad despegó. En 1986, los investigadores suizos descubrieron un nuevo tipo de materiales cerámicos que se convertían en superconductores a temperaturas relativamente altas: los llamados «superconductores de alta temperatura». Su primer compuesto, una combinación de lantano, bario, cobre y oxígeno (conocidos como óxidos de cobre o cupratos), ha realizado la transición a un comportamiento superconductor a 30 kelvin. Un año después, otros científicos diseñaron un material que se convertía en superconductor a temperaturas de aproximadamente 90 kelvin, más caliente que el refrigerante de nitrógeno líquido tan utilizado. Utilizando cerámica de perovskita y mercurio-cupratos (impregnados con talio), las temperaturas de superconductividad han alcanzado ya los 140 kelvin e incluso se pueden alcanzar temperaturas críticas

superiores a altas presiones.

Se supone que estas cerámicas son aislantes, así que esto fue del todo inesperado. Los físicos todavía buscan una nueva teoría que explique la superconductividad de alta temperatura. Sin embargo, su desarrollo es actualmente un campo de la física en rápida expansión.

¿Para qué se utilizan los superconductores? Contribuyen a desarrollar potentes electroimanes, como los que se utilizan en los escáneres de resonancias magnéticas nucleares en los hospitales y en los aceleradores de partículas. Un día se podrán utilizar para los transformadores eficientes o incluso para trenes de levitación magnética. Pero como actualmente funcionan a muy bajas temperaturas, su utilización está algo limitada. De aquí que la investigación se centre en los superconductores de alta temperatura, que podrían tener implementaciones espectaculares.

Cronología

1911 d. C.	Onnes descubre la superconductividad.
1925 d. C.	Se predicen los condensados de Bose-Einstein.
1933 d. C.	Se demuestra que los superconductores repelen los campos magnéticos.
década de 1940 d. C.	Se descubren compuestos superconductores.
1957 d. C.	Se propone la teoría de la superconductividad de BCS.
1986 d. C.	Se crean los superconductores de alta temperatura.
1995 d. C.	Los condensados de Bose-Einstein se fabrican en el laboratorio.

La idea en síntesis: la resistencia es inútil

Sección 4
LA DIVISIÓN DE LOS ÁTOMOS

32. El átomo de Rutherford

Los átomos no son los más pequeños bloques constituyentes de la materia que antaño se creía. A principios del siglo XX, los físicos como Ernest Rutherford empezaron a estudiarlos, desvelando las primeras capas de electrones y después una parte central dura, o núcleo, de protones y neutrones. Para mantener unido el núcleo se inventó una nueva fuerza fundamental: la fuerza nuclear fuere. La era atómica había dado comienzo.

La idea de que la materia está compuesta por una multitud de átomos minúsculos existe desde la época de los griegos. Pero mientras que los griegos pensaban que el átomo era el componente más pequeño e indivisible de la materia, los físicos del siglo XX se dieron cuenta de que esto no era así y comenzaron a investigar la estructura interna del átomo.

El modelo del pudín

El primer nivel a abordar era el del electrón. Los electrones fueron liberados de los átomos en 1887 por Joseph John Thomson, quien disparó una corriente eléctrica a través de un gas contenido en un tubo de cristal. En 1904, Thomson propuso el «modelo del pudín» del átomo, donde los electrones cargados negativamente se espolvorean como pasas en una masa esponjosa de carga positiva. Hoy se habría llamado el modelo de la magdalena de chocolate. El átomo de Thomson era básicamente una nube de cargas positivas que contienen electrones, que se pueden liberar con relativa facilidad. Tanto los electrones como las cargas positivas se mezclan por el «pudín».

El núcleo

Al cabo de poco tiempo, en 1909, Ernest Rutherford quedó desconcertado ante el

resultado de un experimento que había realizado, en el cual las pesadas partículas alfa se disparaban a través de una delgada lámina de oro, tan fina que la mayoría de las partículas la atravesaban. Ante el asombro de Rutherford, una diminuta fracción de las partículas rebotaban hacia atrás en la lámina, dirigiéndose hacia él. Cambiaban de dirección 180 grados, como si hubieran chocado contra un muro de ladrillos. Se dio cuenta de que en el interior de los átomos de oro que componían la lámina había algo duro y macizo capaz de repeler las pesadas partículas alfa.

ERNEST RUTHERFORD (1971-1937)

El neozelandés Rutherford fue un alquimista contemporáneo, que transmutó un elemento, el nitrógeno, en otro, oxígeno, por medio de la radiactividad. Líder inspirador del Laboratorio Cavendish en Cambridge, Inglaterra, fue mentor de numerosos futuros ganadores del Premio Nobel. Recibió el apodo de «el cocodrilo» y este animal sigue siendo el símbolo del laboratorio en la actualidad. En 1910, sus investigaciones en la difusión de los rayos alfa y la naturaleza de la estructura interna del átomo le condujeron a identificar el núcleo.

Rutherford comprendió que el modelo del pudín de Thomson no podía explicar esto. Si un átomo era tan sólo un engrudo de partículas cargadas positiva y negativamente, ninguna sería lo bastante pesada para golpear de vuelta a la pesada partícula alfa. Por lo tanto, pensó que los átomos de oro debían tener un centro denso, llamado «núcleo» por el vocablo latino para la semilla de una nuez. Aquí nació un campo de la física nuclear: la física de los núcleos atómicos.

Isótopos

Los físicos sabían cómo calcular la masa de diferentes elementos de la tabla periódica, de forma que conocían los pesos relativos de los átomos. Pero era más difícil ver cómo se ordenaban las cargas. Como Rutherford sólo conocía los electrones y los núcleos cargados positivamente, trató de equilibrar las cargas suponiendo que el núcleo estaba compuesto de una mezcla de protones (partículas

cargadas positivamente que había descubierto en 1918 al aislar los núcleos de hidrógeno) y algunos electrones que neutralizaban parcialmente la carga. Los electrones restantes giraban alrededor del núcleo en los conocidos orbitales de la teoría cuántica. El hidrógeno, que es el elemento más ligero, tiene un núcleo que contiene sólo un protón con un electrón que orbita alrededor de él.

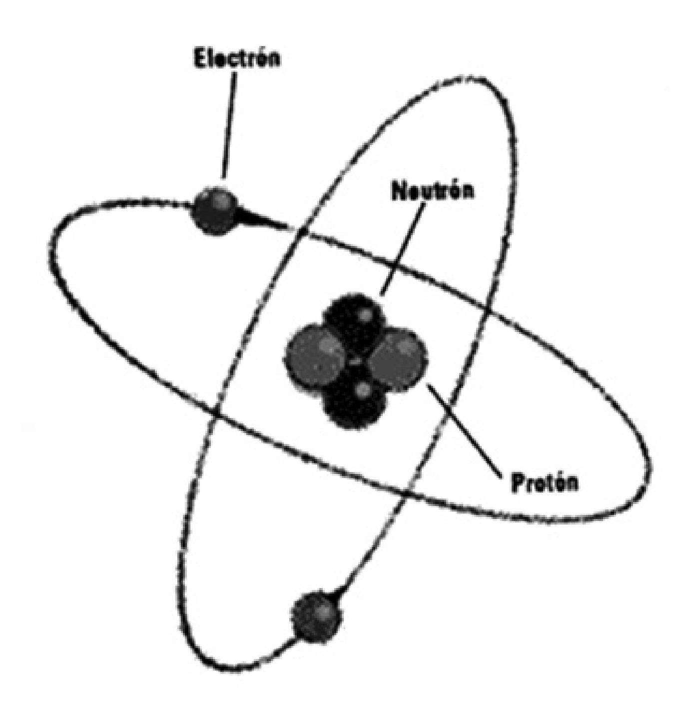
«Era tan increíble como si dispararas un cartucho de 15 pulgadas a un trozo de papel de seda y éste volviera hacia ti.»
Ernest Rutherford, 1964

Un trío

Las sustancias radiactivas emiten tres tipos de radiación, llamadas alfa, beta y gamma. La radiación alfa consiste en pesados núcleos de helio que comprenden dos protones y dos neutrones unidos. Como son pesadas, las partículas alfa no llegan demasiado lejos antes de perder su energía en colisiones y se pueden detener con facilidad, incluso mediante un trozo de papel. El segundo tipo de radiación corresponde a las partículas beta; éstas son electrones de alta velocidad, muy ligeros y cargados negativamente. Las partículas beta llegan más lejos que la radiación alfa, pero se pueden detener por medio de un metal como una placa de aluminio. El tercer tipo son los rayos gamma, que son ondas electromagnéticas asociadas con fotones y que por tanto carecen de masa, pero poseen una gran cantidad de energía. Los rayos gamma son muy penetrantes y sólo pueden detenerse mediante bloques de hormigón o plomo. Los tres tipos de radiación son emitidos por átomos inestables que calificamos de radiactivos.

También se conocían algunas otras formas de elementos con pesos extraños, llamados isótopos. El carbono normalmente tiene un peso de 12 unidades atómicas, aunque en ocasiones se puede encontrar con un peso de 14 unidades. El carbono-14 es inestable con una vida media (el tiempo que tardan en desintegrarse la mitad de los átomos al emitir una partícula radiactiva) de 5.730 años, emitiendo una

partícula beta para convertirse en nitrógeno-14. Esta reacción se utiliza para determinar la edad por medio de radiocarbono de los materiales arqueológicos de miles de años de antigüedad, como la madera o el carbón de las hogueras.



Neutrones

A principios de los años treinta, se descubrió un nuevo tipo de «radiación», que era lo bastante pesada para liberar protones de la parafina, pero sin carga. El físico de Cambridge James Chadwick demostró que esta nueva radiación era en realidad una partícula neutra con la misma masa que el protón. Se bautizó con el nombre de neutrón y el modelo atómico fue reorganizado. Los científicos se dieron cuenta de que un átomo de carbono-12, por ejemplo, contiene 6 protones y 6 neutrones en el núcleo (lo que le confiere una masa de 12 unidades atómicas) y 6 electrones que giran alrededor. Los neutrones y protones se conocen como núcleo.

«Nada existe salvo los átomos y el espacio vacío; todo lo demás es una opinión.» Demócrito, 460-370 a. C.

Fuerza fuerte El núcleo es muy pequeño, comparado con el tamaño total del átomo y sus electrones orbitando alrededor. Cientos de miles de veces más pequeño que el átomo, el núcleo ocupa tan sólo unos pocos femtómetros (10^{-15}

metros). Si el átomo fuera proporcional al diámetro de la Tierra, el núcleo central sería sólo de 10 kilómetros de ancho, la longitud de Manhattan. El núcleo alberga prácticamente toda la masa del átomo en un punto diminuto y esto incluye muchas decenas de protones. ¿Qué mantiene unidas todas las cargas positivas en un espacio tan pequeño y con tanta fuerza? Para vencer la repulsión electrostática de las cargas positivas y mantener el núcleo unido, los físicos tuvieron que inventar un nuevo tipo de fuerza, llamada fuerza nuclear fuerte.

Si los dos protones se acercan mucho, inicialmente se repelen a causa de sus cargas similares (siguiendo la ley de la inversa del cuadrado de Maxwell). Pero si se acercan todavía más, la fuerza nuclear fuerte los bloquea juntos. La fuerza fuerte sólo aparece en separaciones muy pequeñas, pero es mucho mayor que la fuerza electroestática. Si los protones son atraídos aún más cerca el uno del otro, se resisten, actuando como esferas macizas; por tanto, hay un límite estricto a lo próximos que pueden llegar a estar. Este comportamiento significa que el núcleo está fuertemente unido, muy compacto y duro como una roca.

En 1934, Hideki Yukawa propuso que la fuerza nuclear era transportada por partículas especiales (llamadas mesones) que actúan de forma similar a los fotones. Protones y neutrones están adheridos por los mesones, que se intercambian. Incluso en la actualidad sigue siendo un misterio la razón por la que la fuerza nuclear fuerte actúa a una escala de distancias tan precisa: por qué es tan débil fuera del núcleo y tan fuerte a corta distancia. Es como si bloqueara a los nucleones a una distancia precisa. La fuerza nuclear fuerte es una de las cuatro fuerzas fundamentales, junto con la gravedad, el electromagnetismo y otra fuerza nuclear llamada fuerza débil.

Cronología

1887 d. C.	Thomson descubre el electrón.
1904 d. C.	Thomson propone el modelo de pudín.
1909 d. C.	Rutherford realiza su experimento de la lámina de oro.
1911 d. C.	Rutherford propone el modelo nuclear.
1918 d. C.	Rutherford aísla el protón.
1932 d. C.	Chadwick descubre el neutrón.

1934 d. C. Yukawa propone la fuerza nuclear fuerte.

La idea en síntesis: el núcleo macizo

33. Antimateria

Las naves espaciales de ciencia ficción a menudo se mueven mediante «propulsores de antimateria», y sin embargo la antimateria propiamente dicha es real e incluso se ha creado artificialmente en la Tierra. Una imagen especular de la materia con energía negativa, la antimateria no puede coexistir con la materia durante mucho tiempo; ambas se aniquilan con una descarga de energía si entran en contacto. La propia existencia de la antimateria sugiere profundas simetrías en la física de partículas.

La antimateria fue augurada en la década de 1920 y descubierta en la de 1930 al unir la teoría cuántica y la relatividad.

Es una imagen especular de la materia en la que las cargas de partículas, las energías y otras propiedades cuánticas son de signo invertido. Por tanto, un antielectrón, llamado positrón, tiene la misma masa que el electrón, pero en cambio tiene carga positiva. Del mismo modo, los protones y otras partículas tienen hermanos de antimateria opuestos.

«Por cada mil millones de partículas de antimateria había mil millones de partículas de materia. Y cuando la mutua aniquilación se completó, quedó una millonésima, que es nuestro actual universo.» Albert Einstein, 1879-1955

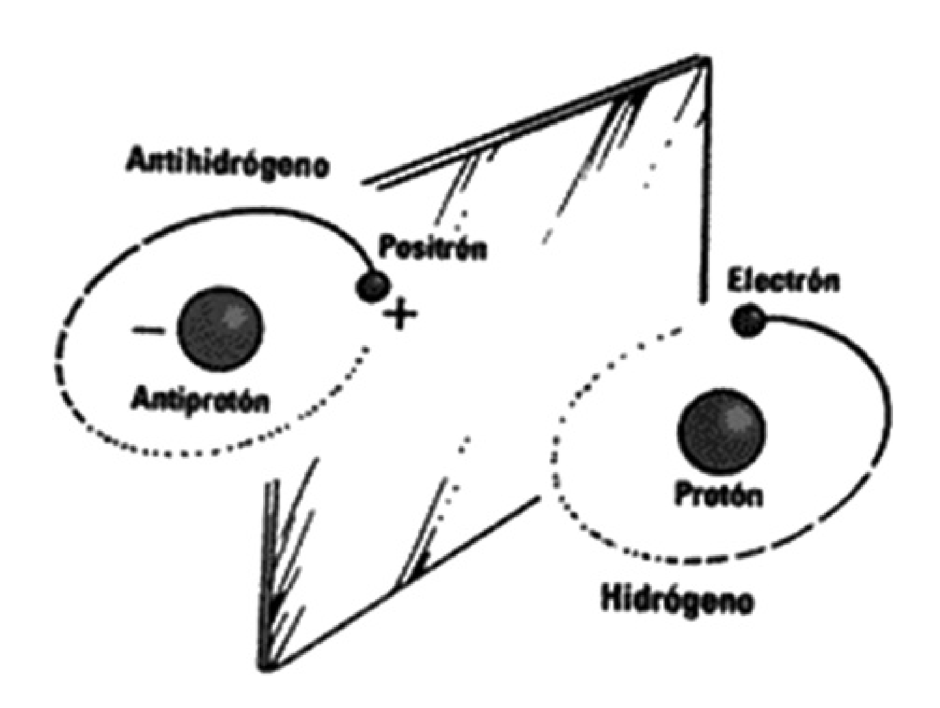
Energía negativa

Al crear una ecuación para el electrón en 1928, el físico británico Paul Dirac vio que ofrecía la posibilidad de que los electrones pudieran tener energía negativa además de positiva. Dirac tenía dos formas de resolver su problema: se esperaba que la energía positiva asociada a un electrón normal, pero la energía negativa no tenía sentido. En lugar de ignorar este término confuso, Dirac sugirió que estas partículas existían realmente. Este estado complementario de la materia es la «antimateria».

Antipartículas

La caza de la antimateria comenzó sin demora. En 1932, Carl Anderson confirmó la

existencia de positrones experimentalmente. Seguía el rastro de lluvias de partículas producidas por los rayos cósmicos. Observó la trayectoria de una partícula cargada positivamente con la masa del electrón, el positrón. Por tanto, la antimateria ya no era simplemente una idea abstracta, sino que era real.



Pasarían dos décadas más antes de que fuera detectada la siguiente antipartícula, el antiprotón. Los físicos construyeron nuevas máquinas aceleradoras de partículas que utilizaban los campos magnéticos para incrementar la velocidad de las partículas que viajaban por su interior. Estos poderosos rayos de protones acelerados produjeron suficiente energía para revelar el antiprotón en 1955. Al cabo de poco, se descubrió también el antineutrón.

Con los bloques constituyentes de la antimateria en su lugar, ¿era posible construir un antiátomo o, al menos, un antinúcleo? La respuesta, tal y como se confirmó en 1965, era que sí. Se creó un antinúcleo de hidrógeno pesado (deuterio), un antideuterio, que contenía un antiprotón y un antineutrón, en el CERN europeo y en el Laboratorio norteamericano Brookhaven. Agregar un positrón a un antiprotón para formar un antiátomo de hidrógeno (antihidrógeno) tardó un poco más, pero se logró en 1995. Actualmente los investigadores están analizando si el antihidrógeno se comporta de la misma forma que el hidrógeno normal.

En la Tierra, los físicos pueden crear antimateria en aceleradores de partículas, como los del CERN en Suiza o el Fermilab cerca de Chicago. Cuando los rayos de partículas y antipartículas se encuentran, se aniquilan mutuamente con una descarga de energía pura. La masa se convierte en energía de acuerdo con la ecuación de Einstein, $E=mc^2$.

Asimetrías universales

Si la antimateria se extendiera por el universo, estos episodios de aniquilación tendrían lugar continuamente. La materia y la antimateria se destruirían una a otra gradualmente con pequeñas explosiones, barriéndose mutuamente. Como habitualmente no observamos esto, será que no hay demasiada antimateria en el mundo. De hecho, la materia normal es la única forma extendida de partículas que vemos. Por tanto, desde el principio de la creación del universo ha tenido que existir un desequilibrio en el sentido de que se creó más cantidad de materia normal que de su opuesta antimateria.

PAUL DIRAC (1902-1984)

Paul Dirac fue un físico británico de gran talento, aunque tímido. La gente bromeaba porque su vocabulario consistía en «sí», «no» y «no lo sé». En una ocasión dijo: «En la escuela me enseñaron que no debía empezar nunca una frase si no conocía su final». Lo que le faltaba en labia, lo compensaba con su capacidad para las matemáticas. Su tesis doctoral es famosa por su impresionante brevedad y por lo impactante, al presentar una nueva descripción matemática de la mecánica cuántica. Unificó parcialmente las teorías de la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad, aunque también se le recuerda por su excelente trabajo sobre los monopolos magnéticos y por su predicción de la antimateria. Al obtener el Premio Nobel en 1933, el primer pensamiento de Dirac fue renunciar a él para evitar la publicidad. Pero cedió al enterarse de que conseguiría más publicidad a causa de su renuncia.

Como todas las imágenes especulares, las partículas y sus antipartículas están relacionadas por medios de diferentes tipos de simetría. Una es el tiempo.

«En ciencia, uno trata de decir a la gente, de una forma que sea comprendida por todos, algo que nadie sabía hasta entonces. En poesía, es exactamente lo contrario.» Paul Dirac, 1902-1984

A causa de su energía negativa, las antipartículas son equivalentes matemáticamente a las partículas normales que retroceden en el tiempo. Por lo tanto, se puede imaginar un positrón como un electrón que viaja del futuro al pasado. La asimetría siguiente se refiere a la carga y a otras propiedades cuánticas, que están invertidas, lo que se conoce como «conjugación de cargas». Una tercera simetría hace referencia al movimiento a través del espacio. Volviendo al principio de Mach, en general los movimientos no se ven afectados si cambiamos la dirección de las coordenadas marcando la cuadrícula espacial. Una partícula que se mueve de izquierda a derecha tiene el mismo aspecto que una que se mueve de derecha a izquierda, o sea, que no cambia ya gire en el sentido de las agujas del reloj o en el contrario.

«Lo opuesto de una afirmación correcta es una afirmación falsa. Pero lo opuesto de la profunda verdad puede ser otra profunda verdad.» Niels Bohr, 1895-1962

Esta simetría de la «paridad» es cierta en la mayoría de partículas, pero hay unas pocas para las que no se sostiene. Los neutrinos existen sólo en una forma, como neutrinos zurdos, que sólo giran en un sentido; no existen los neutrinos diestros. Lo inverso es cierto para los antineutrinos, que son todos diestros. Así pues, la simetría de la paridad a veces se puede quebrantar, aunque se conserva una combinación de la conjugación de carga o abreviadamente simetría CP.

Igual que los químicos encuentran que algunas moléculas prefieren existir en una versión, como estructura diestra o zurda, es un gran misterio por qué el universo contiene en su mayoría materia y no antimateria. Una diminuta fracción —menos del 0,01%— de la materia del universo está compuesta de antimateria. Pero el universo también contiene formas de energía, incluyendo un gran número de fotones. De modo que es posible que una enorme cantidad de materia y antimateria se creara en el big bang, pero después la mayor parte de ésta fue

aniquilada al cabo de poco tiempo. Un minúsculo desequilibrio a favor de la materia sería suficiente para explicar su dominio actual. Para lograrlo sólo hace falta que sobreviviera 1 de cada 10.000.000.000 (10^{10}) de partículas de materia durante una fracción de segundo tras el big bang, aniquilándose las restantes. La materia sobrante probablemente se preservó por medio de una ligera asimetría de la violación de la simetría CP.

Las partículas que pudieran estar involucradas en esta asimetría son una especie de bosón pesado, llamados bosones X, que todavía están por descubrir. Estas partículas masivas se desintegran de una forma ligeramente desequilibrada para producir una leve superproducción de materia. Los bosones X también pueden interaccionar con los protones y hacer que se desintegren, lo que sería una mala noticia ya que significa que toda la materia desaparecerá finalmente en una bruma de partículas aún más finas. Pero la buena noticia es que la escala de tiempo para que esto suceda es *muy* larga. Que estemos aquí y que nadie haya presenciado nunca una desintegración de un protón significa que los protones son muy estables y que tienen que vivir al menos entre 10^{17} y 10^{35} años, o miles de millones de miles de millones de miles de millones de años, inmensamente más que la vida del universo hasta ahora. Pero esto plantea la posibilidad de que el universo envejezca mucho, y entonces incluso la materia normal podría desaparecer un día.

Cronología

1828 d. C.	Dirac vaticina la existencia de la antimateria.
1932 d. C.	Anderson detecta el positrón.
1955 d. C.	Se detectan los antiprotones.
1965 d. C.	Se produce el primer antinúcleo.
1995 d. C.	Se crean los átomos de antihidrógeno.

La idea en síntesis: materia de imagen especular

34. Fisión nuclear

La demostración de la fisión nuclear es uno de los grandes altibajos de la ciencia. Su descubrimiento llenó un enorme vacío en nuestra comprensión de la física nuclear y el amanecer de la energía atómica. Pero el paraguas de la guerra conllevó que esta nueva tecnología fuera implementada casi de inmediato en armamento nuclear, devastando las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki y desencadenó el problema de la proliferación nuclear, que aún hoy sigue siendo difícil de resolver.

A inicios del siglo XX, comenzó a desvelarse el mundo interno del átomo. Igual que una muñeca rusa, contiene varias capas externas de electrones que envuelven un hueso duro o núcleo. A principios de la década de 1930, el propio núcleo fue roto, revelándose como una mezcla de protones cargados positivamente y neutrones sin carga, ambos mucho más pesados que el efímero electrón y unidos por la fuerza nuclear fuerte. Conseguir despegar el adhesivo energético del núcleo se convirtió en el santo grial para los científicos.

Ruptura

El primer intento exitoso para dividir el núcleo tuvo lugar en 1932. Cockcroft y Walton en Cambridge, Inglaterra, dispararon protones a gran velocidad sobre metales.

«... gradualmente llegamos a la conclusión de que quizá no habría que pensar en el núcleo como si estuviera partido por la mitad con un cincel, sino que quizá había algo de cierto en la idea de Bohr de que el núcleo era como una gota líquida.» Otto Frisch, 1967

Los metales cambiaron de composición y liberaron energía de acuerdo con la ecuación $E=mc^2$ de Einstein. Pero estos experimentos precisaban un aporte de energía mayor que la que se creaba y por tanto los físicos no creían que fuera posible aprovechar esta energía para usos comerciales.

En 1938 los científicos alemanes Otto Hahn y Fritz Strassmann dispararon

neutrones sobre el elemento pesado uranio, tratando de crear nuevos elementos aún más pesados. En su lugar, descubrieron que emitían elementos mucho más ligeros, algunos con la mitad de la masa del uranio. Era como si el núcleo se rompiera por la mitad al ser bombardeado por algo que tenía menos de la mitad de su masa; como una sandía que se divide en dos mitades al ser golpeada por una cereza. Hahn comunicó esto a Lise Meitner, la colega austríaca exiliada que acababa de huir de la Alemania fascista a Suecia. Meitner se sintió igualmente asombrada y discutió este resultado con su sobrino físico, Otto Frisch. Meitner y Frisch se percataron de que la energía se liberaba cuando el núcleo se dividía porque las dos mitades asumían menos energía en conjunto. A su regreso de Dinamarca, Frisch no pudo contener su excitación y comentó su idea con Niels Bohr. Embarcado en un viaje hacia América, Bohr se puso a trabajar de inmediato para elaborar una explicación, transmitiendo las noticias a Enrico Fermi, de la Universidad de Columbia.

Meitner y Frisch publicaron su artículo adelantándose a Bohr, introduciendo la palabra «fisión», copiando la división de una célula biológica. De vuelta en Nueva York, Fermi y el exiliado húngaro Léo Szilard se dieron cuenta de que esta reacción del uranio producía neutrones sobrantes capaces de generar muchas fisiones y, por tanto, podría prolongarse hasta producir una reacción nuclear en cadena (una reacción autoalimentada). Fermi obtuvo la primera reacción en cadena en 1942 en la Universidad de Chicago, bajo el estadio de fútbol.

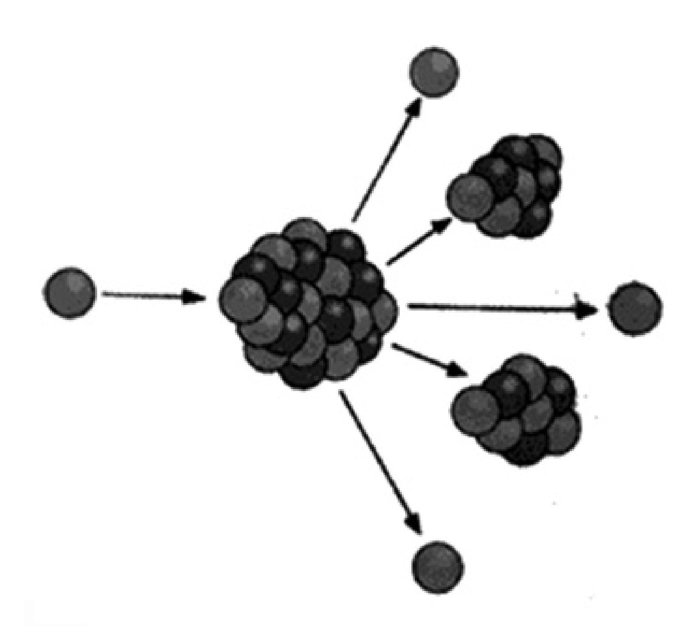
La energía nuclear

Las reacciones subcríticas en cadena pueden mantenerse estables y utilizarse en las centrales nucleares. Las palancas de control de boro regulan el flujo de neutrones por el combustible de uranio absorbiendo los neutrones sobrantes. Además, se requiere un refrigerante para reducir el calor procedente de las reacciones de fisión. El más común es el agua, pero también se utilizan agua presurizada, gas helio y sodio líquido. En la actualidad, Francia es la primera potencia nuclear del mundo, y produce más del 70% de su energía total comparado con el 20% aproximadamente en Estados

Unidos o el Reino Unido.

Reacción en cadena

El colega físico Arthur Compton recordaba el día: «En el balcón, una docena de científicos vigilaban los instrumentos y manejaban los controles. En la habitación había una enorme pila cúbica de bloques de grafito y uranio en el que esperábamos desarrollar la reacción en cadena.



En unas aberturas practicadas en esta pila estaban las barras de control y seguridad. Tras unas cuantas pruebas preliminares, Fermi dio la orden de retirar otros 30 cm la barra de control. Sabíamos que ésa iba a ser la prueba definitiva. Los contadores Geiger que registraban los neutrones del reactor comenzaron a chasquear cada vez más rápido hasta que el ruido llegó a ser ensordecedor. La reacción aumentó hasta el punto de que podía haber peligro de radiación en la plataforma donde nos encontrábamos. "Tirad de las palancas de seguridad", ordenó Fermi. El estruendo de los contadores descendió a una débil serie de chasquidos. Por primera vez, se había liberado energía atómica. Se había controlado y se había detenido. Alguien tendió a Fermi una botella de vino italiano y se efectuó un pequeño brindis».

El proyecto Manhattan

Szilard estaba tan preocupado porque los científicos alemanes copiaran su logro que contactó con Albert Einstein y ambos presentaron una carta conjunta para advertir la presidente Roosevelt en 1939.

Sin embargo, hasta 1941 no sucedió gran cosa, pero ese año los físicos británicos compartieron un cálculo en el que mostraban lo fácil que era construir un arma nuclear. Esto coincidió con el ataque japonés a Pearl Harbour y muy pronto Roosevelt inició el proyecto nuclear norteamericano, conocido como proyecto Manhattan. Estaba dirigido por el físico de Berkeley Robert Oppenheimer desde una remota y secreta base en Los Álamos, Nuevo México.

«Creí que ese día quedaría como una jornada negra en la historia de la humanidad… también era consciente del hecho de que había que hacer algo si los alemanes conseguían la bomba antes que nosotros… Tenían a la gente adecuada, para lograrlo… No teníamos elección, o al menos así lo creíamos.»
Léo Szilard, 1898-1964

En el verano de 1942, el equipo de Oppenheimer diseñó los mecanismos de la bomba. Para iniciar la reacción en cadena que desembocara en una explosión era necesaria una masa crítica de uranio, que había que dividir antes de la detonación. Se favorecieron dos técnicas, un mecanismo del «revólver», en el que se disparaba un trozo de uranio dentro de otro con explosivos convencionales para completar la masa crítica, y un mecanismo de «implosión», donde los explosivos convencionales hacían que una esfera hueca de uranio implosionara en un núcleo de plutonio.

El uranio se puede encontrar en dos tipos o isótopos, con un número diferente de neutrones en el núcleo. El isótopo más común, el uranio-238, es diez veces más común que el otro, el uranio-235. Este último es el más efectivo para una bomba de fisión, así que se enriquece el uranio crudo a uranio-235. Cuando el uranio-238 recibe un neutrón se convierte en uranio-239. El plutonio-239 es inestable y su ruptura produce mayor número de neutrones por gramo, de manera que al mezclarlos con plutonio se puede iniciar fácilmente una reacción en cadena. El método del revólver se utilizó con uranio enriquecido para construir el primer tipo de bomba de implosión esférica, que contenía plutonio, y se le dio el nombre de

implosión esférica, que contenía plutonio, y se le dio el nombre de «Fat Man».

El 6 de agosto «Little Boy» fue lanzada contra Hiroshima. Tres días después, «Fat Man» destruyó Nagasaki. Cada bomba liberó el equivalente de unas 20.000 toneladas de dinamita, matando en el acto entre 70.000 y 100.000 personas, y el doble a más largo plazo.

Cronología

1932 d. C.	James Chadwick descubre el neutrón.
1938 d. C.	Se observa la fisión atómica.
1942 d. C.	Se produce la primera reacción en cadena.
1945 d. C.	Se lanzan las bombas atómicas en Japón.
1951 d. C.	Se genera electricidad por medio de energía nuclear.

La idea en síntesis: la división del átomo

35. Fusión nuclear

Todos los elementos que nos rodean son el producto de una fusión nuclear. La fusión impulsa a estrellas como el Sol, dentro de la cual se crean todos los elementos más pesados que el hidrógeno. Si pudiéramos aprovechar la energía de las estrellas en la Tierra, la fusión podría llegar a ser la clave de una energía limpia ilimitada.

La fusión nuclear es la combinación de los núcleos atómicos ligeros para formar otros más pesados. Cuando se comprimen lo bastante, los núcleos de hidrógeno se pueden fundir para producir helio, emitiendo energía en el proceso.

Gradualmente, al formar núcleos cada vez más pesados mediante una serie de reacciones de fusión, todos los elementos que vemos a nuestro alrededor pueden ser creados desde cero.

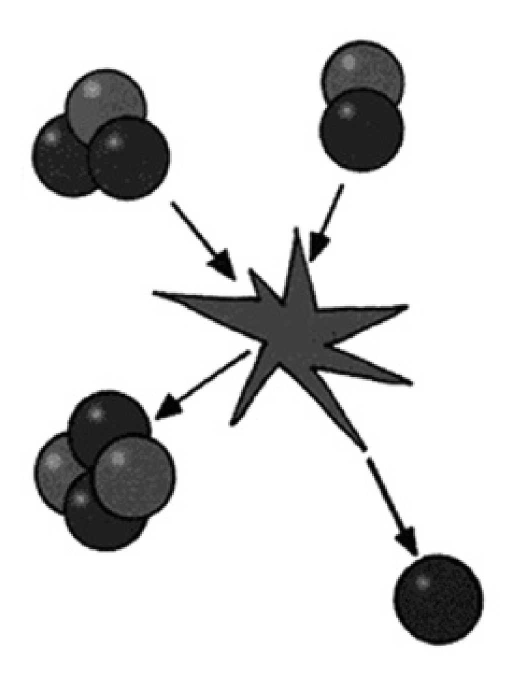
«Les pido que miren en ambos sentidos. Pues el camino que conduce a saber algo de las estrellas pasa por el átomo; importantes conocimientos sobre el átomo se han alcanzado a través de las estrellas.» Sir Arthur Eddington, 1928

Un fuerte apretón

Fusionar incluso los núcleos más ligeros, como el hidrógeno, es tremendamente difícil. Se necesitan una temperatura y una presión descomunales, pues la fusión sólo ocurre de forma natural en lugares extremos, como el Sol y otras estrellas. Para que dos núcleos se fusionen, hay que vencer a las fuerzas que los mantienen unidos. Los núcleos están formados de protones y neutrones bloqueados juntos por medio de la fuerza nuclear fuerte. La fuerza fuerte es la dominante a la minúscula escala del núcleo y es mucho más débil fuera de éste. Como los protones están cargados positivamente, sus cargas eléctricas se repelen mutuamente, separándose además ligeramente. Pero la cohesión de la fuerza fuerte es más poderosa, así que el núcleo se mantiene unido.

Como la fuerza nuclear fuerte actúa en un corto rango preciso, su fuerza combinada es mayor para los núcleos pequeños que para los grandes. Para un núcleo pesado,

como el uranio, con 238 nucleones, la atracción mutua no será tan fuerte entre los nucleones de los lados opuestos de los núcleos.



Por otra parte, la fuerza eléctrica de repulsión todavía se percibe en las separaciones más grandes y por ello se hace más fuerte en los núcleos más grandes porque puede abarcar todo el núcleo. También es potenciada por el mayor número de cargas positivas que contiene. El efecto neto de este equilibrio es que la energía necesaria para mantener al núcleo unido, promediado por nucleón, aumenta con el peso atómico hasta los elementos níquel y hierro, que son muy estables, y después vuelve a disminuir para los núcleos más grandes. Así que la fisión de los grandes núcleos tiene lugar con relativa facilidad ya que puede ser interrumpida por un pequeño golpe.

En la fusión, la barrera de energía que hay que vencer es menor para los isótopos del hidrógeno que contienen un sol protón. El hidrógeno se presenta en tres tipos: los átomos «normales» de hidrógeno contienen un protón rodeado de un solo electrón; el deuterio, o hidrógeno pesado, tiene un protón, un electrón y también un neutrón; el tritio tiene dos neutrones añadidos, así que es aún más pesado. La reacción de fusión más simple es, por tanto, la combinación de hidrógeno y deuterio para formar tritio además de un solo neutrón.

Reactores de fusión

Los físicos tratan de replicar estas condiciones extremas en los reactores de fusión para generar energía. Sin embargo, están a muchos decenios de lograrlo en la práctica. Incluso las máquinas de fusión más avanzadas utilizan más energía de la que emiten.

La energía de fusión es el santo grial de la producción energética. Comparadas con la tecnología de la fisión, las reacciones de fusión son relativamente limpias y, si funcionaran, eficientes. Hacen falta muy pocos átomos para producir enormes cantidades de energía (de la ecuación de Einstein $E=mc^2$), se generan muy pocos residuos y desde luego nada tan perjudicial como los elementos superpesados que proceden de los reactores de fisión. La energía de fusión tampoco produce gases de efecto invernadero, ofreciendo la promesa de una fuente de energía independiente y fiable, suponiendo que su combustible, hidrógeno y deuterio, se pueda fabricar. Pero tampoco es perfecta: producirá ciertos subproductos radiactivos, como neutrones, que serán liberados en las reacciones principales y tendrán que ser eliminados.

La fusión fría

En 1989, el mundo científico fue sacudido por una afirmación controvertida. Martin Fleischmann y Stanley Pons anunciaron que habían realizado una fusión nuclear no en un enorme reactor, sino en un tubo de ensayo. Disparando corriente eléctrica a través de un vaso de precipitados de agua pesada (cuyos átomos de hidrógeno se habían sustituido por deuterio), la pareja creyó haber creado energía por medio de la fusión «fría». Dijeron que su experimento producía más energía de la necesaria para realizarse debido a la fusión producida. Esto provocó un tumulto. La mayoría de los científicos pensaban que Fleischmann y Pons se equivocaban al justificar su presupuesto energético, pero en el momento actual esta cuestión no se ha zanjado aún. Otros sostuvieron que las reivindicaciones de la fusión producida en un laboratorio habían

ocurrido de forma ocasional. En 2002, Rudi Taleyarkhan propuso que la fusión estaba tras la llamada sonoluminiscencia, en la que las burbujas de un fluido emiten luz al ser pulsadas (y calentadas) rápidamente por ondas ultrasónicas.

A estas temperaturas tan elevadas, la principal dificultad es controlar los gases abrasadores, así que aunque se haya logrado la fusión estas máquinas monstruosas sólo funcionan durante unos pocos segundos cada vez. Un equipo internacional de científicos colabora para construir un reactor de fusión aún mayor en Francia, llamado Reactor Experimental Termonuclear Internacional (ITER), que analizará la viabilidad de comercializar la fusión.

Polvo de estrellas

Las estrellas son reactores de fusión naturales. El físico alemán Hans Bethe describió cómo brillaban al convertir núcleos de hidrógeno (protones) en núcleos de helio (dos protones y dos neutrones). En la transferencia intervienen partículas adicionales (positrones y neutrinos), de forma que dos de los protones originales se convierten en neutrones en el proceso.

Dentro de las estrellas, se forman gradualmente elementos más pesados por pasos mediante la cocción por fusión, igual que en una receta de cocina. Se forman núcleos cada vez mayores a través de una sucesión de pasos, de «quemar» primero hidrógeno, después helio y después otros elementos más ligeros que el hierro, y finalmente los elementos más pesados que el hierro. Las estrellas como el Sol brillan porque son en su mayor parte hidrógeno que se fusiona con helio y esto se desarrolla con la suficiente lentitud para que los elementos pesados se produzcan únicamente en pequeñas cantidades. En las estrellas más grandes esta reacción se acelera debido a la intervención de los elementos carbono, nitrógeno y oxígeno en reacciones posteriores. Por tanto, se producen más elementos pesados con mayor rapidez. Una vez el helio está presente, el carbono se puede obtener a partir de él (fusión de tres átomos de helio-4, vía berilio-8 inestable). Una vez que se obtiene un poco de carbono se puede combinar con helio para formar oxígeno, neón y magnesio. Estas lentas transformaciones tardan la mayor parte de la vida

de una estrella. Los elementos más pesados que el hierro se producen en reacciones ligeramente diferentes, construyendo gradualmente secuencias de núcleos siguiendo el orden creciente de la tabla periódica.

Las primeras estrellas

Algunos de los primeros elementos ligeros no fueron creados en las estrellas, sino en la propia bola de fuego del big bang. Al principio del universo era tan caliente que ni siquiera los átomos eran estables. A medida que se fue enfriando, los átomos de hidrógeno fueron los primeros en condensarse junto con una pequeña cantidad de helio y litio, y una minúscula cantidad de berilio. Éstos fueron los primeros ingredientes de todas las estrellas y de todas las cosas. Todos los elementos más pesados que éstos fueron creados en el interior y alrededor de las estrellas, y después fueron lanzados al espacio por medio de estrellas que explotaban, llamadas supernovas. Sin embargo, todavía no hemos llegado a comprender realmente cómo se encendieron las primeras estrellas. La primera estrella de todas no contenía elementos pesados, sólo hidrógeno, y por tanto no pudo enfriarse lo bastante rápido para colapsarse y encender su mecanismo de fusión.

«Somos pequeños fragmentos de materia estelar que se enfriaron por accidente, fragmentos de una estrella desviada.» Sir Arthur Eddington, 1882-1944

La fusión es una fuente de energía fundamental en el universo. Si conseguimos explotarla, nuestras preocupaciones por la energía se habrán acabado. Pero eso significa aprovechar el enorme potencial de las estrellas aquí en la Tierra, lo que no es fácil.

Cronología

1920 d. C.	Eddington aplica la idea de la fusión a las estrellas.
1932 d. C.	La fusión del hidrógeno se demuestra en un laboratorio.
1939 d. C.	Hans Bethe describe los procesos de fusión estelar.
1946/1954 d. C.	Fred Hoyle explica la producción de elementos más

	pesados.
1957 d. C.	E. Burbidge, G. Burbidge, Fowler y Hoyle publican un famoso trabajo sobre nucleosíntesis.

La idea en síntesis: energía estelar

36. El modelo estándar

Los protones, neutrones y electrones no son más que la punta del iceberg de las partículas físicas. Los protones y neutrones están compuestos de quarks aún más pequeños, los electrones van acompañados de neutrinos y las fueras están mediadas por un séquito de bosones, incluyendo los fotones. El «modelo estándar» reúne todo el zoo de partículas en un solo árbol de familia.

Para los griegos, los átomos eran los componentes más pequeños de la materia. Hasta el final del siglo XIX no se infirió la existencia de ingredientes aún menores en los átomos, primero electrones y después protones y neutrones. Entonces, ¿son estas tres partículas los bloques constituyentes últimos de la materia?

Pues no. Incluso los protones y neutrones son de naturaleza corpuscular. Están compuestos de partículas aún más pequeñas llamadas quarks. Y eso no es todo. Igual que los fotones contienen fuerzas electromagnéticas existe una miríada de partículas diversas que transmiten las demás fuerzas fundamentales. De acuerdo con nuestros conocimientos, los electrones son indivisibles, pero están emparejados con neutrinos prácticamente carentes de masa. Las partículas también poseen un doble de antimateria. Todo esto suena muy complicado y lo es, pero esta plétora de partículas se puede comprender en un sistema único llamado modelo estándar de física de partículas.

«Incluso si hay una teoría unificada posible, se trata únicamente de un conjunto de reglas y ecuaciones. ¿Qué es lo que insufla fuego en las ecuaciones y crea un universo que puede ser descrito por ellas?» Stephen Hawking, 1988

Excavación

A principios del siglo XX, los físicos sabían que la materia estaba compuesta de protones, neutrones y electrones. Según la teoría cuántica, Niels Bohr describió la disposición de los electrones en una serie de capas alrededor del núcleo, como las órbitas planetarias alrededor del Sol. Las propiedades del núcleo eran aún más

extrañas. Pese a sus cargas positivas repelentes, los núcleos podían albergar decenas de protones junto con neutrones comprimidos en una pequeña y dura nuez, unidos por una fuerza nuclear fuerte precisa. Pero cuanto más se avanzaba en el conocimiento de la radiactividad acerca de la ruptura de los núcleos (a través de la fisión) o la unión de los mismos (a través de fusión), resultó evidente la necesidad de explicar nuevos fenómenos.

En primer lugar, la combustión de hidrógeno de helio en el Sol, por medio de una fusión, implica a otra partícula, el neutrino, que transforma protones en neutrones. En 1930, se infirió la existencia del neutrino para explicar la desintegración de un neutrón en un protón y un electrón: la desintegración radiactiva beta. El propio neutrino no fue descubierto hasta 1956, sin apenas masa. Por tanto, en la década de 1930 había aún muchos cabos sueltos. Al estirar de algunos de estos hilos, en las décadas de 1940 y 1950 se descubrieron otras partículas y la colección se amplió.

Producto de esta investigación se desarrolló el modelo estándar, que consiste en un árbol de familia de las partículas subatómicas. Hay tres tipos básicos de partículas fundamentales, los «hadrones» compuestos de «quarks»; otros llamados «leptones», que incluyen los electrones; y después partículas (bosones) que transmiten fuerzas, como los fotones. Tanto los quarks como los leptones cuentan también con su antipartícula correspondiente.

Quarks

Los quarks fueron bautizados con este nombre por una frase de El despertar de Finnegan, de James Joyce, en el que describía el grito de las gaviotas. Escribió que lanzaban «tres quarks» o tres brindis.

Quarks

En los años sesenta, al disparar electrones sobre protones y neutrones, los físicos descubrieron en su interior partículas aún más pequeñas, a las que llamaron quarks. Los quarks se presentan en tríos. Son de tres «colores»: rojo, azul y verde. Igual que los electrones y protones tienen carga eléctrica, los quarks tienen una «carga de color», que se conserva cuando cambian de un tipo a otro de quark. La

carga de color no tiene nada que ver con los colores visibles de la luz, es sólo que los físicos tuvieron que agudizar la imaginación y encontrar una forma arbitraria para nombrar las extrañas propiedades cuánticas de los quarks.

«El elemento creativo de la mente humana… surge de un modo misterioso igual que las partículas experimentales que existen momentáneamente en grandes ciclotrones, para desvanecerse de nuevo como fantasmas infinitesimales.» Sir Arthur Eddington, 1928

Del mismo modo que las cargas eléctricas producen una fuerza, las cargas de colores (quarks) pueden ejercer fuerzas unas sobre otras. La fuerza de color es transmitida por una partícula de fuerza llamada «gluón». La fuerza de color se hace más fuerte cuanto más separados están los quarks, de modo que se adhieren unos a otros como si estuvieran sujetos por una banda elástica invisible. Como el vínculo del campo de la fuerza de color es tan fuerte, los quarks no pueden existir por sí mismos y tienen que estar siempre bloqueados juntos en combinaciones de color que sean globalmente neutras (que no presenten ninguna carga de color). Las posibilidades incluyen grupos de tres llamados bariones (del griego «barys», pesado), dentro de los cuales se encuentran los protones y neutrones normales o los pares quark-antiquark (llamados mesones).

Además de tener carga de color, los quarks se presentan en seis tipos o «sabores». Cada generación está formada por tres pares de masa creciente. Los más ligeros son los quarks «arriba» y «abajo»; a continuación, están los quarks «extraño» y «encanto»; y finalmente el par de quarks más pesados, «cima» y «fondo». Los quarks arriba, encanto y cima tienen cargas eléctricas +2/3, y los quarks abajo, extraño y fondo tienen carga -1/3. Por tanto, hacen falta tres quarks para formar un protón (dos arriba y uno abajo) o un neutrón (dos abajo y uno arriba).

Leptones

La segunda clase de partículas, los leptones, están relacionados con los electrones y además los incluyen. De nuevo, hay tres generaciones de masa creciente: electrones, muones y taus. Los muones son unas 200 veces más pesados que el electrón y los taus unas 3.700 veces. Los leptones tienen una sola carga negativa.

También tienen una partícula asociada llamada neutrino (electrón, muón y tau-neutrino), que carece de carga. Los neutrinos no tienen apenas masa y no interactúan demasiado con nada. Viajan por la Tierra sin ser percibidos, por lo que son difíciles de captar. Todos los leptones tienen antipartículas.

Interacciones Las fuerzas fundamentales están mediadas por el intercambio de partículas. Igual que la onda electromagnética que también se puede imaginar como una corriente de fotones, la fuerza nuclear débil se puede imaginar como si fuera transportada por partículas W y Z, mientras que la fuerza nuclear fuerte se transmite por medio de gluones. Como el fotón, estas otras partículas son bosones, que pueden existir todos en el mismo estado cuántico simultáneamente. Los quarks y los leptones son fermiones, y no pueden.

Colisiones de partículas ¿Cómo conocemos todas estas partículas subatómicas? En la segunda mitad del siglo XX, los físicos expusieron el funcionamiento interno del átomo y de las partículas por medio de la fuerza bruta: los aplastaron.



La física de partículas ha sido descrita como si cogiéramos un complicado reloj

suizo, lo aplastáramos a martillazos y luego buscáramos los fragmentos para averiguar cómo funciona.



Los aceleradores de partículas utilizan imanes gigantes para acelerar partículas hasta velocidades extremas y después estrellan esos rayos de partículas contra un blanco o bien contra otro rayo en dirección opuesta. A velocidades moderadas, las partículas se fragmentan levemente liberando las generaciones más ligeras de partículas. Dado que la masa equivale a la energía, hace falta un rayo de partículas de energía superior para liberar a las últimas generaciones de partículas (las más pesadas).

A continuación, hay que identificar las partículas producidas en los colisionadores de átomos fotografiando su trayectoria al pasar a través de un campo magnético. En el campo magnético, las partículas cargadas positivamente giran bruscamente en un sentido y las negativas en el otro. La masa de las partículas también determina lo rápido que alcanzan el detector y cuánto se curva su trayectoria debido al campo magnético. Por lo tanto, las partículas ligeras apenas se curvan y las partículas más pesadas pueden llegar a formar bucles en espiral. Al trazar un gráfico de sus características por medio del detector y compararlas con las que cabría esperar según la teoría, los físicos de partículas pueden señalar de cuáles se trata.

Algo que todavía no se ha incluido en el modelo estándar es la gravedad. Se ha postulado la existencia del «gravitón» o partícula que transmite la fuerza gravitatoria, pero únicamente como una idea. A diferencia de la luz, aún no hay evidencias de que la gravedad posea naturaleza granulosa. Algunos físicos han intentado incluir la gravedad en el modelo estándar en lo que podría ser una Teoría de la Gran Unificación (TGU). Pero todavía está muy lejos.

Cronología

aprox. 400 a. C.	Demócrito propone la idea del átomo.
1930 d. C.	Wolfgang Pauli predice la existencia del neutrino.
1956 d. C.	Se detectan los neutrinos.

década de 1960 d. C.	Se proponen los quarks.
1995 d. C.	Se descubre el quark «cima».

La idea en síntesis: todo queda en familia

37. Diagramas de Feynman

Los diagramas de Feynman son unos ingeniosos esquemas que se pueden utilizar como método abreviado para resolver las complejas ecuaciones de la física de partículas. La interacción de cada partícula se puede representar mediante tres flechas que convergen en un punto, dos de las cuales indican la partícula entrante y saliente, y la tercera muestra la partícula que transmite la fuerza. Al agregar muchas partículas, los físicos pueden calcular las probabilidades de la ocurrencia de las interacciones.

Richard Feynman fue un carismático físico de partículas californiano, famoso tanto por ser un gran profesor y un habilidoso intérprete de bongos, como por sus ideas físicas. Propuso un nuevo lenguaje simbólico para describir las interacciones de partículas, el cual, debido a su simplicidad, se ha venido utilizando desde entonces.

Feynman estaba tan obsesionado con sus diagramas que los pintó en el lateral de su furgoneta. Cuando alguien le preguntó la razón, él simplemente respondió: «Porque soy Richard Feynman».

Como método abreviado para complejas ecuaciones matemáticas, Feynman simplemente dibujó flechas. Cada flecha representa una partícula, una entrante y otra saliente, además de otra sinuosa que representa la interacción. Por tanto, la interacción de cada partícula puede mostrarse como tres flechas que convergen en un punto o vértice. Se pueden simular interacciones más complicadas a partir de varias de estas formas.

Los diagramas de Feynman son algo más que herramientas gráficas. No sólo ayudan a los físicos a mostrar los mecanismos por los cuales interactúan las partículas subatómicas, sino que dibujarlas les ayuda a calcular la probabilidad de que esa interacción tenga lugar.

Esquemas

Los diagramas de Feynman representan las interacciones de partículas utilizando una serie de flechas para indicar la trayectoria de las partículas que intervienen.

Normalmente los diagramas se dibujan de forma que el tiempo crece hacia la derecha, de modo que los electrones entrantes o salientes se dibujarán como flechas que apuntan hacia la derecha.



Normalmente están inclinadas para indicar movimiento. En el caso de las antipartículas, como son equivalentes a las partículas reales que se mueven hacia atrás en el tiempo, sus flechas se dibujan señalando hacia detrás, de derecha a izquierda. Vamos a ver algunos ejemplos.



El primer diagrama representa a un electrón que emite un fotón. El electrón entrante (flecha izquierda) experimenta una interacción electromagnética en la intersección de las tres trayectorias, que produce otro electrón saliente (flecha

derecha) y un fotón (línea ondulada).



La partícula real no se especifica, sólo la mecánica o interacción. Podría ser también un protón emitiendo un fotón.

Aquí, el electrón u otra partícula entrante absorbe un fotón para producir un segundo electrón más energético.



Ahora las flechas están invertidas por lo que éstas deben ser antipartículas. Este diagrama debe referirse a un antielectrón o positrón (flecha izquierda) que absorbe un fotón para producir otro positrón (flecha derecha).

Y aquí, un electrón y un positrón se combinan y se aniquilan para emitir un fotón de energía pura.



Se pueden combinar dos o más triples vértices para mostrar una secuencia de acontecimientos. Aquí una partícula y una antipartícula se aniquilan para crear un fotón, que después se desintegra en otro par de partícula-antipartícula.

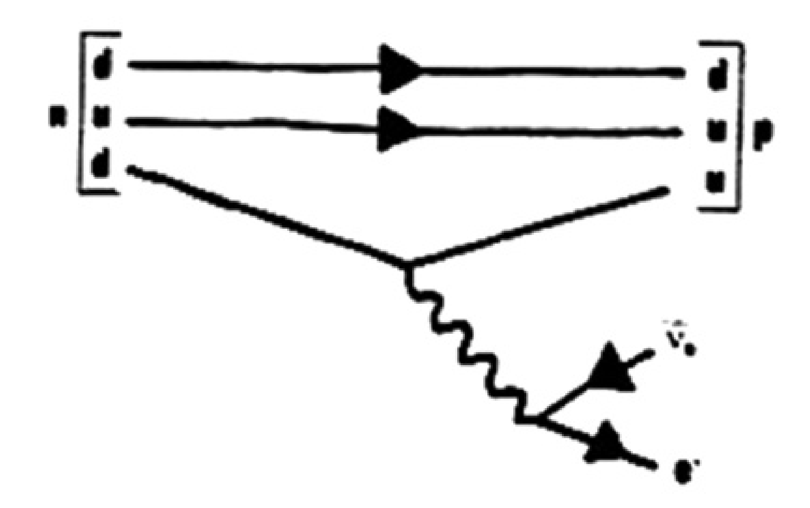
Estos vértices se pueden utilizar para representar muchos tipos diferentes de interacciones. Pueden utilizarse para cualquier partícula, incluyendo a los quarks además de los leptones y sus correspondientes interacciones utilizando fuerzas electromagnéticas, y fuerzas nucleares débiles o fuertes. Todas ellas siguen unas cuantas reglas básicas. La energía se debe conservar, las líneas que entran y salen del diagrama deben ser partículas reales (como protones o neutrones, y no quarks libres que no pueden existir aisladamente), pero los estados intermedios pueden involucrar a cualquier partícula subatómica y a partículas virtuales siempre y cuando al final se conviertan todas en partículas reales.

RICHARD FEYNMAN (1918-1988)

Richard Feynman fue un físico brillante y estrafalario. Obtuvo las mejores notas en el examen de ingreso a la Universidad de Princeton y llamó la atención de personajes como Einstein. Cuando se unió al proyecto Manhattan siendo un joven físico, Feynman afirmó haber presenciado directamente las pruebas de la explosión, diciendo que era seguro mirar a través del cristal de un parabrisas porque éste bloquearía los rayos ultravioletas. Aburrido y atrapado en el desierto de los Álamos, Feynman se dedicó a forzar los archivos logrando abrir las cerraduras al adivinar los números que los físicos escogían como clave, como por ejemplo el logaritmo natural log e = 2,71828… Dejaba notas graciosas y sus colegas estaban convencidos de que había un espía entre ellos. También

comenzó a tocar el tambor para entretenerse, lo que le valió una reputación de ser un excéntrico. Después de la guerra, Feynman se trasladó a Caltech, donde disfrutaba de la enseñanza y se ganó el sobrenombres de «the great explainer» (el gran conferenciante); fue autor de numerosos libros incluyendo Conferencias de Física de Feynman. Tomó parte en la comisión que investigó el desastre de la nave Challenger y fue como siempre muy directo. Su trabajo abarca el desarrollo de la electrodinámica cuántica, la física de los superfluidos y la fuerza nuclear débil. Más adelante sentó las bases de la computación cuántica y la nanotecnología en una charla: «Hay mucho sitio al fondo». Feynman era un espíritu intrépido y le encantaba viajar. Como se le daban tan bien los símbolos, intentó incluso descifrar los jeroglíficos mayas. Su compañero físico Freeman Dyson escribió en una ocasión que Feynman era «mitad genio, mitad bufón», aunque más tarde lo cambió por «todo un genio, todo un bufón».

Este cuadro describe la desintegración radiactiva beta. A la izquierda hay un neutrón, formado por dos quarks «abajo» y un quark «arriba». En la interacción se transforma en un protón, que está formado por dos quarks arriba y un quark abajo, más un electrón y n antineutrino. Aquí participan dos interacciones. Un quark abajo del neutrón se transforma en un quark arriba produciendo un bosón W (representado por una línea ondulada), el mediador de la fuerza nuclear débil. A continuación, el bosón W se desintegra en un electrón y un antineutrino.



El bosón W no se observa en los productos de la interacción, pero participa en la etapa intermedia.

> *Esquemas similares a los de Feynman fueron utilizados por el físico de partículas John Ellis, que los llamó diagramas del pingüino por una apuesta que hizo con uno de sus alumnos en un bar: si perdía una partida de dardos tendría que utilizar la palabra pingüino en su siguiente trabajo. Dispuso los diagramas verticalmente en la hoja y pensó que recordaban un poco la silueta de un pingüino. Así que se quedó con ese nombre.*

Probabilidad

Estos diagramas no son sólo un método abreviado muy adecuado para visualizar las interacciones, también pueden informarnos sobre la probabilidad de que éstas se produzcan. Por lo tanto, también constituyen unas potentes descripciones matemáticas de ecuaciones complejas. Al tratar de calcular lo probable que es una interacción tenemos que saber cuántas formas hay de que llegue a producirse. Aquí es donde los diagramas demuestran su validez. Si dibujamos todas las diferentes variaciones de las interacciones, todas las diferentes variaciones de las interacciones, todos los distintos caminos para ir desde la entrada hasta la salida implicando numerosas interacciones, y los contamos, podemos calcular las

probabilidades de que cada una de ellas tenga lugar.

Electrodinámica cuántica

Feynman propuso sus diagramas mientras se desarrollaba la electrodinámica cuántica en la década de 1940. El pensamiento subyacente de esta teoría es bastante similar al principio de Fermat para la propagación de la luz: la luz sigue todas las trayectorias posibles, pero la más probable es la más corta, y aquella en que la mayoría de los rayos luminosos viajan en fase. Aplicando una idea similar a los campos electromagnéticos, la teoría del campo cuántico se desarrolló después de 1927 y desembocó en la electrodinámica cuántica.

La electrodinámica cuántica describe las interacciones electromagnéticas, mediadas por los intercambios de fotones, de modo que combina la mecánica cuántica con una descripción del campo eléctrico y las partículas subatómicas. Al tratar de calcular las probabilidades de todas las interacciones posibles, Feynman tuvo la idea de su notación gráfica. Tras la electrodinámica cuántica, los físicos extendieron esta representación para abarcar los campos de fuerza de color de los quarks, una teoría denominada cromodinámica cuántica. Y después la electrodinámica cuántica se fusionó con la fuerza nuclear débil en una fuerza «electrodébil» combinada.

Cronología

1927 d. C.	Se inicia el trabajo en teoría del campo cuántico.
década de 1940 d. C.	Se desarrolla la electrodinámica cuántica.
1945 d. C.	Se desarrollan y se utilizan bombas atómicas.
1975 d. C.	Se propone la cromodinámica cuántica.

La idea en síntesis: aproximación en tres etapas

38. La partícula divina

Mientras caminaba por las Tierras Altas escocesas en 1964, el físico Peter Higgs discurrió una forma de asignar a las partículas su masa. Declaró haber tenido «una gran idea». Las partículas parecen tener mayor masa porque van más despacio cuando flotan en un campo de fuerza, que actualmente se conoce como campo de Higgs. Esta fuerza es transmitida por el bosón de Higgs, al que el ganador del Premio Nobel Lederman se refirió como la «partícula divina».

¿Por qué tienen masa las cosas? Un camión es pesado porque contiene un gran número de átomos, cada uno de los cuales por sí mismo ya es relativamente pesado. El acero contiene átomos de hierro, que se localizan en la parte inferior de la tabla periódica. Pero ¿por qué es pesado un átomo? Después de todo, en su mayor parte es espacio vacío. ¿Por qué un protón es más pesado que un electrón un neutrino, o un fotón?

Aunque las cuatro fuerzas fundamentales o interacciones eran bien conocidas en la década de 1960, todas se apoyaban en partículas mediadoras bastante diferentes. Los fotones transmiten información en las interacciones electromagnéticas, los gluones vinculan a los quarks con la fuerza nuclear fuerte, y los bosones W y Z transmiten fuerzas nucleares débiles. Pero los fotones carecen de masa, mientras que los bosones W y Z son partículas con una elevada masa, cientos de veces tan masivas, como el protón. ¿Por qué son tan diferentes? Esta discrepancia era especialmente aguda dado que las teorías de las fuerzas electromagnética y débil podían combinarse en una fuerza electrodébil. Pero esta teoría no predecía que las partículas transmisoras de fuerza nuclear débil, los bosones W y Z, tuvieran masa. Tenían que ser igual que un fotón, sin masa. Cualquier nueva combinación de fuerzas fundamentales, como pretendía la teoría de gran unificación, también tropezaba con el mismo problema. Los portadores de fuerza no deberían tener masa. ¿Por qué no eran todos como el fotón?

Movimiento lento

La gran idea de Higgs fue pensar que esos portadores de fuerzas se deceleraban al pasar por un campo de fuerza de fondo. Actualmente denominado campo de Higgs, también actúa por medio de la transferencia de bosones, llamados bosones de Higgs. Imagine que tiramos una gota en un vaso.

«Lo más obvio era tratar de probarlo con la teoría de campo gauge más simple de todas, la electrodinámica, para romper su simetría y ver lo que realmente ocurre.» Peter Higgs, 1929

Tardará más tiempo en llegar al fondo si el vaso está lleno de agua que si está vacío y lleno de aire. Es como si la gota tuviera una masa mayor al encontrarse dentro del agua, la gravedad tarda más tiempo en atraerla a través del líquido. Lo mismo se podría aplicar a nuestras piernas si camináramos dentro del agua, las notaríamos más pesadas y nuestro movimiento sería más lento. La gota iría aún más despacio si la tiráramos en un vaso de sirope, tardando un rato en hundirse. El campo de Higgs actúa de una forma similar, como un líquido viscoso. La fuerza de Higgs reduce la velocidad de otras partículas portadoras de fuerza, asignándoles efectivamente una masa. Actúa con mayor fuerza sobre los bosones W y Z que sobre los fotones, haciendo que éstos parezcan más pesados.

El campo de Higgs es bastante parecido a un electrón que se mueve por una red de cristal de núcleos cargados positivamente, como un metal. El electrón se decelera un poco porque es atraído por las cargas positivas, de modo que parece tener una masa mayor que en la ausencia de esos iones. Ésta es la fuerza electromagnética en acción, mediada por los fotones. El campo de Higgs funciona de forma similar, pero los bosones de Higgs transmiten la fuerza. También podríamos imaginar que es como una estrella de cine que entra en una fiesta llena de Higgs. La estrella encuentra difícil atravesar la habitación a causa de todas las interacciones sociales que le obligan a ir más despacio.

Si el campo de Higgs asigna una masa a los otros bosones portadores de fuerza, ¿cuál es la masa del bosón de Higgs? ¿Y dónde obtiene su propia masa? ¿No es esto como la situación del hubo y la gallina?

Ruptura de simetría en los imanes

A temperaturas extremadamente altas, todos los átomos de un

imán están desordenados, los campos magnéticos creados son aleatorios y el material no es magnético. Pero cuando la temperatura desciende por debajo de un punto determinado, llamado Temperatura de Curie, los dipolos magnéticos se alinean y producen un campo magnético general.

Lamentablemente las teorías no predicen la masa del propio bosón de Higgs, aunque sí predicen la necesidad de que la tenga en el modelo estándar de la física de partículas. Por consiguiente, los físicos esperan observarlo, pero no saben lo difícil que será o cuándo será posible (todavía no se ha detectado). Debido a la búsqueda en curso de partículas con sus propiedades, sabemos que su masa debe ser mayor que las energías alcanzadas de forma experimental. Por lo tanto, es muy pesado, aunque todavía habrá que esperar para saber cuánto.

Revólver humeante

La próxima máquina que tratará de detectar la partícula de Higgs es el Gran Colisionador de Hadrones (en inglés, LHC, *Large Hadron Collider*) del CERN en Suiza. El CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*), la Organización Europea para la Investigación Nuclear, es un enorme laboratorio de investigación en física de partículas situado cerca de Ginebra. Las instalaciones cuentan con anillos de túneles, el mayor de los cuales está dispuesto en un círculo de 27 km de longitud a 100 m bajo tierra. En el LHC unos imanes gigantes aceleran protones formando un rayo que sigue la trayectoria de las curvas. Éstos se aceleran de forma continua mientras giran, haciendo que su velocidad aumente sin cesar. Se crearán dos rayos opuestos y, cuando viajen a máxima velocidad, los rayos se dispararán uno contra otro de forma que los protones acelerados colisionen frontalmente. Las enormes energías producidas permitirán que se libere temporalmente toda una variedad de partículas masivas que serán registradas por los detectores, junto con sus productos de desintegración si su vida es muy breve. El objetivo del LHC es encontrar indicios de la partícula de Higgs, enterrada entre miles de millones de otras partículas. Los físicos saben lo que buscan, pero no deja de ser difícil

conseguirlo. Si las energías son lo bastante grandes, el Higgs quizá aparezca durante una fracción de segundo, antes de desaparecer en medio de una cascada de partículas. Por consiguiente, en lugar de buscar el propio Higgs, los físicos tienen que buscar un revólver humeante y después volver a poner todas las piezas juntas en su lugar para deducir su existencia.

Ruptura de simetría

¿Cuándo podría aparecer el bosón de Higgs? Y después, ¿cómo podemos llegar hasta los fotones y otros bosones? Como el bosón de Higgs debe de ser muy pesado, sólo puede aparecer a energías extremas y, debido al principio de incertidumbre de Heisenberg (véase capítulo 26), tan sólo durante un tiempo brevísimo. En los albores del universo, las teorías presuponen que todas las fuerzas estaban unidas en una superfuerza. A medida que el universo se enfrió, las cuatro fuerzas fundamentales fueron separándose, a través de un proceso llamado ruptura de simetría.

Aunque la ruptura de simetría es un tanto difícil de imaginar, de hecho es bastante simple. Marca el punto en el que la simetría se elimina de un sistema a través de una ocurrencia. Un ejemplo es cuando tenemos una mesa redonda dispuesta con todos los servicios, cubertería y servilletas. Es simétrica porque no importa dónde se siente cada uno, la mesa siempre será igual. Pero si una persona coge una servilleta, se pierde la simetría, se puede determinar dónde se encuentra uno respecto a esa posición. Se ha producido una ruptura de simetría. Este único suceso tiene unas repercusiones, puede significar que todos los demás comensales cojan la servilleta que tienen a la izquierda, para igualar el evento inicial. Si hubieran cogido la servilleta del lado opuesto, entonces habría sucedido lo contrario. Pero el patrón que sigue viene determinado por un suceso desencadenante aleatorio. Del mismo modo, cuando el universo se enfría, los sucesos hacen que las fuerzas se desacoplen una a una.

Aunque los científicos no consigan detectar el bosón de Higgs con el LHC, el resultado será interesante. Desde los neutrinos hasta el quark cima, hay 14 órdenes de magnitud de masa que el modelo estándar aún necesita explicar. Esto es difícil de llevar a cabo incluso con el bosón de Higgs, que es el ingrediente que

falta. Si encontramos esta partícula divina todo saldrá bien, pero si no es así habrá que reajustar el modelo estándar. Y eso requerirá nuevas ideas físicas. Creemos conocer todas las partículas del universo; el bosón de Higgs es el único eslabón perdido.

Cronología

1687 d. C.	Los *Principia* de Newton establecen las ecuaciones para la masa.
1964 d. C.	Higgs tiene una intuición sobre qué da masa a las partículas.
2007 d. C.	Se construye el Gran Colisionador de Hadrones del CERN.

La idea en síntesis: nadar contra corriente

39. Teoría de cuerdas

Aunque la mayor parte de los físicos se sienten satisfechos trabajando con el modelo estándar consolidado, aunque incompleto, otros buscan nuevas ideas físicas incluso antes de que el modelo estándar se haya probado para ser descartado o confirmado. En la actualidad, se ha dado un giro respecto a la dualidad onda-partícula: un grupo de físicos trata de explicar los patrones de las partículas fundamentales tratándolas no como esferas compactas, sino como ondas en una cuerda. Esta idea ha captado la atención de los medios de comunicación y se denomina teoría de cuerdas.

Los teóricos de las cuerdas no están satisfechos con la idea de que las partículas fundamentales, como los quarks, los electrones y los fotones, sean fragmentos indivisibles de materia o energía. Los patrones que les confieren una masa, carga o energía asociada concreta sugieren otro nivel de organización. Estos científicos creen que estos patrones indican profundas armonías. Cada masa o cuanto de energía es un tono armónico de la vibración de una pequeña cuerda. De modo que las partículas se pueden imaginar no como gotas sólidas, sino como filamentos que vibran o cuerdas que forman bucles. En cierto sentido, esto es una nueva interpretación del amor de Kepler por los sólidos geométricos ideales. Es como si las partículas fueran todas patrones de notas que sugieren una escala armónica, que se toca con una sola cuerda.

Vibraciones

En la teoría de cuerdas, las cuerdas no son como las que vemos, por ejemplo, en una guitarra. La cuerda de una guitarra vibra en tres dimensiones espaciales, o quizá pudiéramos reducirlo a dos si imaginamos que el movimiento vibratorio está restringido a un plano a lo largo de su longitud, y arriba y abajo. Pero las cuerdas subatómicas vibran en una sola dimensión, en lugar de la dimensión cero de las partículas representadas como un punto. Su extensión total no es visible para nosotros, pero para realizar las operaciones matemáticas, los científicos calculan las

vibraciones de las cuerdas en más dimensiones, hasta llegar a 10 u 11. Nuestro propio mundo tiene tres dimensiones espaciales y otra temporal. Pero los teóricos de las cuerdas creen que hay muchas más que no vemos, dimensiones que están tan enroscadas que no las percibimos. Las cuerdas de partículas vibran en estos otros mundos.

Las cuerdas pueden tener los extremos abiertos o ser bucles cerrados, pero por lo demás son todas iguales. Por ello, toda la variedad en las partículas fundamentales se plantea únicamente a causa del patrón de vibración de la cuerda, su armónico, y no por el material que forma la propia cuerda.

Una idea poco convencional

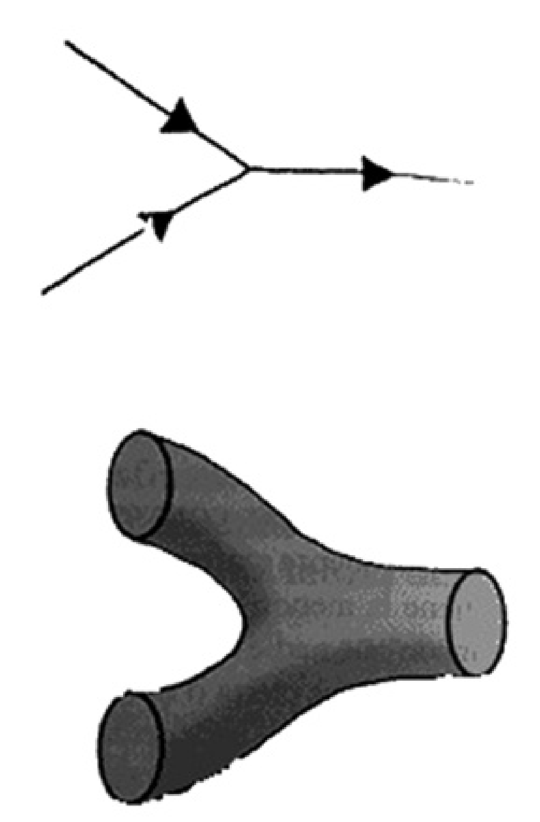
La teoría de cuerdas es una teoría totalmente matemática. Nadie ha visto jamás una cuerda y nadie tiene la menor idea de cómo conocerlas, si existieran de verdad. De modo que nadie ha diseñado aún ningún experimento para probar se esta teoría es cierta o no. Se dice que hay tantas teorías de cuerdas como teóricos de las cuerdas. Esto sitúa a la teoría en una posición incómoda entre los científicos.

El filósofo Karl Popper pensaba que la ciencia avanza básicamente a través de la falsificación. Alguien tiene una idea, la prueba con un experimento, y si es falsa, se descarta alguna cosa, de modo que se aprende algo nuevo y la ciencia progresa. Si la observación encaja con el modelo, entonces no se aprende nada nuevo. Como la teoría de cuerdas todavía no está completamente desarrollada carece de hipótesis definitivamente falsas. Como existen tantas variaciones de la teoría, algunos científicos argumentan que no es realmente ciencia. Los argumentos sobre su posible utilidad llenan páginas enteras de periódicos y revistas, pero los teóricos de las cuerdas están convencidos de que su búsqueda vale la pena.

«Al tener esas dimensiones extra y, por tanto, muchas trayectorias en las que la cuerda puede vibrar, las numerosas y diferentes direcciones resultan ser la clave para conseguir describir todas las partículas que vemos.» Edward Witten, n. 1951

Teoría M

Las cuerdas son esencialmente líneas. Pero en el espacio multidimensional son un



ejemplo limitador de geometrías que incluirían láminas y otras formas multidimensionales. Esta teoría generalizada se denomina teoría M.

No hay una sola palabra que explique la «M», pero podría ser membrana o misterio. Una partícula que se mueve por el espacio garabatea una línea; si la partícula como punto se sumerge en tinta, dibuja una trayectoria lineal, a la que llamamos línea de universo. Una cuerda, por ejemplo, un bucle, trazaría un cilindro. Por tanto, decimos que tiene una lámina de universo. Las interacciones tienen lugar en el punto en que estas láminas se cortan, y en el que las cuerdas se rompen y se recombinan. Así, la teoría M es realmente un estudio de las formas de todas estas láminas en un espacio de 11 dimensiones.

Teoría del todo

Al tratar de explicar todo el zoo de partículas e interacciones en un solo marco, la teoría de cuerdas trata de aproximarse a una «teoría del todo», una única teoría que unifique las cuatro fuerzas fundamentales (electromagnetismo, gravedad y fuerzas nucleares fuerte y débil) y explique las masas de las partículas y todas sus propiedades. Originalmente, Einstein trató de unificar la teoría cuántica y la gravedad en la década de 1940, pero nunca lo logró, ni nadie desde entonces. Einstein fue ridiculizado por su trabajo, ya que se consideraba algo imposible y una pérdida de tiempo. La teoría de cuerdas traslada la gravedad a las ecuaciones, de tal modo que adquiere un gran valor potencial, muy atractivo para los científicos. Sin embargo, está muy lejos de ser formulada de una manera precisa, y mucho más de ser verificada.

La teoría de cuerdas surgió como una novedad, debido a la belleza de sus operaciones matemáticas. En la década de 1920, Theodor Kaluza utilizó armónicos como una forma diferente de describir algunas propiedades inusuales de las

partículas. Los físicos se dieron cuenta de que estas mismas operaciones matemáticas podían servir para describir también ciertos fenómenos cuánticos. En esencia, las matemáticas ondulatorias funcionan bien tanto para la mecánica cuántica como para su extensión a la física de partículas. Posteriormente esto se desarrolló en las primeras teorías de cuerdas. Existen numerosas variantes y en cierto modo continúa estando a una cierta distancia de una teoría holística.

Una teoría de todas las cosas es el objetivo de algunos físicos, que generalmente son reduccionistas y creen que si comprendemos los bloques constituyentes podemos comprender el mundo entero. Si comprendemos el átomo, compuesto de cuerdas vibrantes, entonces se puede inferir toda la química, la biología y así sucesivamente.

«No me gusta que no hagan ningún cálculo. No me gusta que no comprueben sus ideas. No me gusta que para cualquier cosa que discrepa de un experimento se inventen una explicación, un subterfugio para decir "Bueno, pero a pesar de todo podría ser cierto".» Richard Feynman, 1918-1988

Otros científicos consideran ridícula esta actitud. ¿Cómo va a explicar el conocimiento de los átomos la teoría social, la evolución o los impuestos? No se puede abarcar todo sin más. Creen que una teoría así describe el mundo como un ruido sin sentido de interacciones subatómicas, y que es nihilista y errónea. La perspectiva reduccionista ignora el comportamiento macroscópico evidente, como los patrones de los huracanes o el caos, y es descrita por el físico Steven Weinberg como «escalofriante e impersonal. Tiene que ser aceptada tal y como es, no porque nos guste, sino porque el mundo funciona así».

La teoría, o más bien teorías de cuerdas, aún están en un estado de cambio. Todavía no ha surgido ninguna teoría final, pero aún puede tardar un tiempo porque la física se ha complicado tanto que hay que incluir en ella muchas cosas. Considerar el universo como el tañido de numerosas armonías tiene su encanto. Pero sus partidarios a veces también rayan en la intransigencia, pues están tan absortos en los pequeños detalles que menosprecian la importancia de los patrones a gran escala. Por este motivo, los teóricos de las cuerdas pueden mantenerse al margen hasta que surja una visión más consistente.

Cronología

1921 d. C.	Se propone la teoría Kaluza-Klein para unificar el electromagnetismo y la gravedad.
1970 d. C.	Yoichiro Nambu describe la fuerza nuclear fuerte usando las cuerdas de la mecánica cuántica.
mediados de la década de 1970 d. C.	Se obtiene una teoría de la gravedad cuántica.
1984-1986 d. C.	La rápida expansión de la teoría de cuerdas «explica» todas las partículas.
década de 1990 d. C.	Witten y otros desarrollan la teoría M en 11 dimensiones.

La idea en síntesis: armonías universales

Sección 5
ESPACIO Y TIEMPO

40. Relatividad especial

Las leyes de Newton describen cómo se mueven la mayoría de los objetos. Pero Albert Einstein demostró en 1905 que cuando las cosas se mueven con gran rapidez tienen lugar extraños efectos. Al observar un objeto que se aproxima a la velocidad de la luz, vemos que se hace más pesado, se contrae más lentamente en longitud y en edad. Esto ocurre porque nada puede viajar más rápido que la luz, así que el propio tiempo y espacio se distorsionan cuando se aproximan a este límite universal de velocidad.

Las ondas sonoras resuenan en el aire, pero sus vibraciones no pueden atravesar el espacio vacío en el que no hay átomos.

«Lo más incomprensible del mundo es que sea totalmente comprensible.»
Albert Einstein, 1879-1955

Por esta razón es cierto que «en el espacio nadie oirá tu grito». Pero la luz es capaz de propagarse por el espacio vacío, como ya sabemos, puesto que vemos el Sol y las estrellas. ¿Está lleno el espacio de un medio especial, una especie de aire eléctrico, a través del cual se propagan las ondas electromagnéticas? A finales del siglo XIX, los físicos así lo creían y estaban convencidos de que el espacio estaba lleno de un gas o «éter» a través del cual irradiaba la luz.

Velocidad de la luz

Sin embargo, en 1887, un famoso experimento demostró que el éter no existía. Como la Tierra se mueve alrededor del Sol, su posición en el espacio siempre cambia. Albert Michelson y Edward Morley diseñaron un ingenioso experimento que detectaría el movimiento contra el éter si éste fuera fijo. Compararon dos rayos lumínicos que viajaban siguiendo trayectorias diferentes, disparados uno contra

otro formando un ángulo recto y que se reflejaban en unos distantes espejos idénticos. Igual que un nadador tarda menos tiempo en viajar por un río de una orilla a otra y de vuelta a la primera que en nadar la misma distancia río arriba contra la corriente y después a favor de ésta, se esperaba un comportamiento similar de la luz. La corriente del río imitaba el movimiento de la Tierra por el éter. Pero no había tal diferencia, los rayos de luz retornaban a sus puntos de partida exactamente al mismo tiempo. Al margen de la dirección en la que viajara la luz y de cómo se moviera la Tierra, la velocidad de la luz permanecía inalterada. La velocidad de la luz no se veía afectada por el movimiento. El experimento demostró que el éter no existía, pero fue Einstein quien tuvo que ponerlo de relieve.

La paradoja de los gemelos

Imaginemos que la dilatación del tiempo se aplicara a los seres humanos. Podría ser así. Si su gemelo idéntico fuera enviado al espacio en una nave espacial lo bastante rápida y durante el tiempo suficiente, envejecería más lentamente que usted en la Tierra. A su regreso, encontraría que usted ha envejecido, mientras que él continuaría en la flor de la juventud. Aunque esto parece imposible, no es realmente una paradoja porque el gemelo viajero experimentaría poderosas fuerzas que permiten que se produzca un cambio así. A causa de este desplazamiento temporal, los sucesos que aparecen simultáneamente en un sistema quizá no aparezcan de igual modo en otro. Igual que el tiempo va más despacio, las longitudes también se contraen. El objeto o persona que se mueve a esa velocidad no percibirá ningún efecto, sólo se lo parecerá a otro observador diferente.

Igual que el principio de Mach (véase Capítulo 1), esto significaba que no había ninguna cuadrícula fija de fondo contra la que se movieran los objetos. A diferencia de las ondas marinas o las sonoras, la luz siempre viajaba a la misma velocidad. Esto resultaba extraño y se apartaba bastante de nuestra experiencia habitual, donde las velocidades aumentan simultáneamente. Si conducimos un coche a 50

km/h y otro pasa a 65 km/h es como si el suyo permaneciera estacionado y el otro viajara a 15 km/h al avanzarle. Pero aunque corriera a cientos de km/h la luz continuaría viajando a la misma velocidad. Ésta es exactamente de 300 millones de metros por segundo, tanto si lleva una linterna en el asiento de un veloz avión a reacción, como en el sillín de una bicicleta.

«La introducción de una luz-éter demostró ser superflua puesto que… ni será introducido un espacio en absoluto reposo dotado de propiedades especiales, ni será asociado un vector de velocidad a un punto del espacio vacío en el que tengan lugar los procesos electromagnéticos.» Albert Einstein, 1905

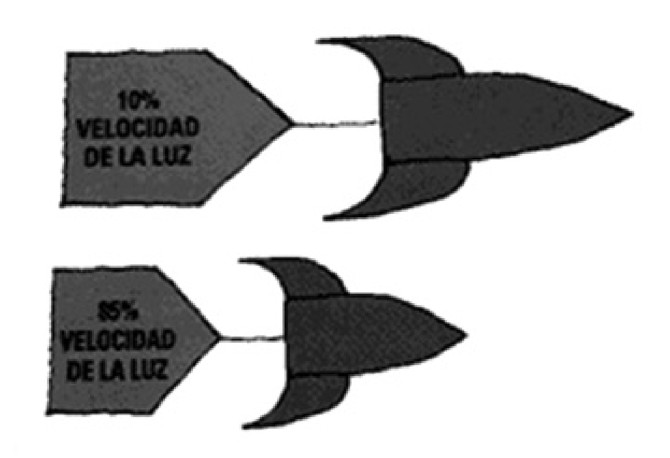
Esta velocidad fija de la luz fue lo que desconcertó a Albert Einstein en 1905, conduciéndole a desarrollar su teoría de la relatividad especial. La relatividad especial fue el mayor avance desde Newton y revolucionó toda la física. Einstein partió del supuesto de que la velocidad de la luz es un valor constante y que es igual para cualquier observador, sin importar la velocidad de su movimiento. Einstein razonó que si la velocidad de la luz no cambia, entonces alguna otra cosa debe cambiar como compensación.

Espacio y tiempo

Siguiendo las ideas desarrolladas por Edward Lorenz, George Fitzgerald y Henri Poincaré, Einstein demostró que el espacio y el tiempo debían distorsionarse para acomodar los diferentes puntos de vista de los observadores que viajaran a una velocidad próxima a la de la luz. La velocidad es la distancia dividida por el tiempo, así que para evitar que algo excediera la velocidad de la luz, las distancias tenían que acortarse y el tiempo avanzar más despacio para compensarlo. Por tanto, un cohete que se aleja de nosotros a una velocidad próxima a la de la luz parece más corto y experimenta el tiempo de una forma más lenta que la nuestra.

Einstein resolvió cómo se podían reescribir las leyes del movimiento para observadores que viajaran a diferentes velocidades. Descartó la existencia de un marco de referencia estacionario, como el éter, y afirmó que todo el movimiento era relativo, sin que existiera ningún punto de vista privilegiado. Si estamos sentados en un tren y vemos que el tren de al lado se mueve, quizá no nos demos

cuenta de cuál de los dos trenes se está moviendo. Además, aunque vea que su tren está parado en el andén no puede suponer que usted está inmóvil, sólo que no se mueve en relación con el andén.



No percibimos el movimiento de la Tierra alrededor del Sol; igualmente, jamás percibimos la trayectoria del Sol por nuestra propia galaxia, ni nuestra Vía Láctea siendo atraída hacia el enorme racimo de galaxias de Virgo más allá de ésta. Todo cuanto experimentamos es el movimiento relativo entre usted y el andén, o el de la Tierra que gira en relación a las estrellas.

Einstein denominó a estos diferentes puntos de vista sistemas de referencia inerciales. Los sistemas inerciales son espacios que se mueven uno en relación a otro a velocidad constante, sin experimentar aceleraciones ni fuerza. Por tanto, si nos encontramos en un coche que circula a 50 km/h estamos en un sistema inercial y percibimos lo mismo que si viajáramos en un tren que circula a 100 km/h (otro sistema inercial) o en un reactor que viajara a 500 km/h (otro más). Einstein predicaba que las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales. Si se le cae un bolígrafo en un coche, tren o avión, caerá al suelo de la misma forma.

«Es imposible viajar más rápido que la velocidad de la luz y desde luego no es aconsejable, porque no dejaría de caernos el sombrero.» Woody Allen, n. 1935

Más despacio y más pesado

Einstein se centró en la comprensión de los movimientos relativos cercanos a la velocidad de la luz, la máxima velocidad alcanzable de manera práctica por la materia, y predijo que el tiempo transcurriría más despacio. La dilatación del tiempo expresaba el hecho de que los relojes en diferentes sistemas inerciales en movimiento pueden funcionar a diferentes velocidades. Esto quedó demostrado en 1971 al enviar cuatro relojes atómicos idénticos en vuelos programados para dar dos veces la vuelta al mundo, dos de ellos hacia el este y otros dos hacia el oeste. Al comparar la hora que marcaban con un reloj igual sobre la superficie de la Tierra en Estados Unidos, los relojes en movimiento habían perdido una fracción de segundo por comparación con el reloj terrestre.

Otra forma para evitar que los objetos sobrepasen la barrera de la velocidad de la luz es que su masa aumente, de acuerdo con $E = mc^2$. Un objeto llegará a ser infinitamente grande a la propia velocidad de la luz, haciendo imposible una mayor aceleración. Y cualquier objeto que tenga masa no puede alcanzar exactamente la velocidad de la luz, sino sólo aproximarse a ella, pues cuanto más se aproxima más pesado se vuelve y más difícil de acelerar resulta. La luz está formada por fotones carentes de masa por lo que éstos no se ven afectados.

La relatividad especial de Einstein supuso una ruptura radical respecto a todo el pensamiento anterior. La equivalencia de la masa y la energía era sorprendente, y también lo eran sus repercusiones para la dilatación del tiempo y la masa. Aunque Einstein era un don nadie científico cuando las publicó, sus ideas fueron leídas por Max Planck y tal vez porque él decidió adoptarlas, las ideas de Einstein fueron aceptadas y no abandonadas.

Cronología

1881 d. C.	Michelson y Morley son incapaces de verificar el éter.
1905 d. C.	Einstein publica la teoría de la relatividad especial.
1971 d. C.	Se demuestra la dilatación en el tiempo haciendo volar unos relojes en el avión.

La idea en síntesis: el movimiento es relativo

41. Relatividad general

Al incorporar la gravedad a su teoría de la relatividad especial, la teoría general de la relatividad de Einstein revolucionó nuestra perspectiva del espacio y el tiempo. Al ir más allá de las leyes de Newton, abrió un universo de agujeros negros, agujeros de gusano y lentes gravitacionales.

Imaginemos que una persona salta desde un edificio elevado o se tira en paracaídas desde un avión, y que experimenta una aceleración hacia el suelo debido a la gravedad. Albert Einstein se dio cuenta de que no: en tal estado de caída libre no se experimentaba la gravedad. En otras palabras, eran ingrávidos. Actualmente en los entrenamientos los astronautas recrean las condiciones de gravedad cero del espacio justamente así, volando en un reactor de pasajeros (con el atractivo nombre de *Vomit Comet*, el cometa de los vómitos), en una trayectoria que imita a una montaña rusa. Cuando el avión vuela hacia arriba los pasajeros son aplastados contra sus asientos, pues experimentan fuerzas gravitatorias aún más intensas. Pero cuando el avión se inclina hacia delante y cae en picado hacia abajo, son liberados de la fuerza de la gravedad y pueden flotar en el cuerpo de la nave.

Aceleración

Einstein reconoció que esta aceleración era equivalente a la fuerza de la gravedad. Por lo tanto, igual que la gravedad especial describe lo que ocurre en los sistemas de referencia o sistemas inerciales que se mueven a una velocidad constante uno en relación a otro, la gravedad era una consecuencia de encontrarse en un sistema de referencia en aceleración. La calificó como la mejor idea de su vida.

Durante los años siguientes, Einstein analizó las consecuencias. Al comentar sus ideas con colegas de reconocido prestigio y utilizando los últimos formalismos matemáticos para resumirlos, reconstruyó toda la teoría gravitatoria y la denominó relatividad general. El año 1915, cuando publicó el trabajo, fue especialmente ajetreado, pues enseguida lo revisó varias veces. Sus colegas estaban asombrados ante sus progresos. La teoría arrojó incluso extrañas predicciones, aunque

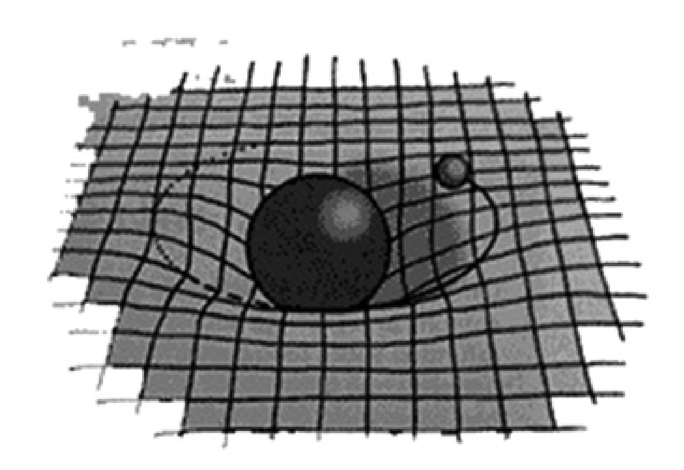
comprobables, incluyendo la idea de que la luz podía curvarse por medio de un campo gravitatorio y también que la órbita elíptica de Mercurio rotaba lentamente a causa de la gravedad del Sol.

Espacio-tiempo

En la teoría de la relatividad general, las tres dimensiones espaciales y la temporal se combinan en una cuadrícula espacio-temporal de cuatro dimensiones o métrica. La velocidad de la luz continúa siendo fija y nada puede excederla. Cuando se mueve y acelera, esta métrica del espacio-tiempo se distorsiona para mantener la velocidad fija de la luz.

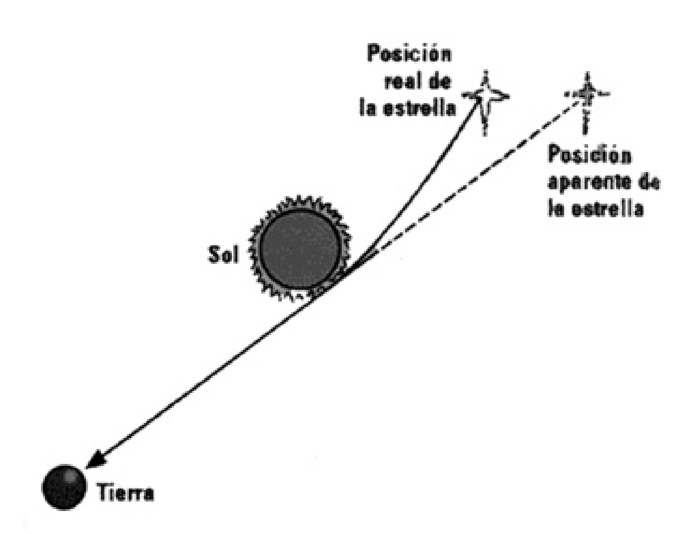
«El tiempo, el espacio y la gravedad no poseen una existencia separada de la materia.» Albert Einstein, 1915

La mejor manera de imaginar la relatividad general es visualizando el espacio-tiempo como una hoja de goma extendida encima de una mesa hueca. Los objetos con masa son como pesadas bolas que se colocan sobre la hoja.



Deprimen el espacio-tiempo a su alrededor. Imagine que coloca una bola que representa la Tierra sobre la hoja. Debajo de ella se forma una depresión en el plano de goma donde se asienta. Si después tira otra bola más pequeña, por ejemplo, un asteroide, rodará por la pendiente hacia la Tierra. Así se demuestra la acción de la gravedad. Si la bola más pequeña se moviera lo bastante rápido y la depresión formada por la Tierra fuera lo bastante profunda, como un ciclista

temerario que se aventura por una pista inclinada, ese cuerpo mantendría una órbita circular como la de la luna. Podemos imaginar todo el universo como una hoja de goma gigante. Cada uno de los planetas, estrellas y galaxias provoca una depresión que puede atraer o desviar a los objetos más pequeños que pasan por su lado, como las bolas rodando por las pistas de un campo de golf.



Einstein comprendió que, debido a esta curvatura del espacio-tiempo, la luz era desviada al pasar cerca de un cuerpo de enorme masa, como el Sol. Predijo que la posición de una estrella que se observa justo detrás del Sol se desplazaría un poco porque su luz se curva cuando pasa junto a la masa solar. El 29 de mayo de 1919, los astrónomos de todo el mundo se reunieron para comprobar las predicciones de Einstein mediante la observación de un eclipse total de Sol. Éste fue uno de sus momentos más grandiosos, pues quedó demostrado que la teoría del que algunos tomaban por un loco estaba, en realidad, muy cerca de la verdad.

Curvaturas y agujeros

La curvatura de los rayos de luz ya ha sido confirmada por la luz que ha viajado a través de todo el universo. La luz de galaxias muy distantes se dobla de forma ostensible cuando pasa por una región muy masiva, como un cúmulo gigantesco de galaxias o una galaxia realmente grande. El punto de luz de fondo se deforma formando un arco. Como esto imita a una lente, el efecto se conoce como

fenómeno de lente gravitacional. Si la galaxia de fondo está justo detrás del objeto pesado que interviene, su luz se deforma y forma un círculo completo, llamado anillo de Einstein. Muchas fotografías de este hermoso espectáculo han sido tomadas gracias al telescopio espacial Hubble.

Las ondas gravitatorias

Otro aspecto de la relatividad general es que las ondas se pueden establecer en la hoja del espacio-tiempo. Las ondas gravitatorias se difunden sobre todo desde los agujeros negros y las densas y compactas estrellas que giran sobre sí mismas, como los pulsares. Los astrónomos han observado el decremento en el espín de los pulsares, así que esperan que esta energía se pierda en las ondas gravitatorias, pero estas ondas todavía no han sido detectadas. Los físicos han construido detectores gigantes en la Tierra y en el espacio, que utilizan el balanceo esperado de rayos láser extremadamente largos para descubrir las ondas cuando pasan por ellos. Si las ondas gravitatorias llegaran a detectarse, sería otro golpe maestro de la teoría de la relatividad general de Einstein.

Actualmente, la teoría de la relatividad general de Einstein se aplica extensamente a la simulación de modelos globales del universo.

«Por lo tanto, supondremos la equivalencia física total de un campo gravitatorio y la correspondiente aceleración del sistema de referencia. Esta suposición amplía el principio de la relatividad al caso del movimiento uniformemente acelerado del sistema de referencia.» Albert Einstein, 1907

El espacio-tiempo se considera como un paisaje completo, con colinas, valles y simas. La relatividad general ha superado todo tipo de pruebas de observación hasta el momento. Las regiones en las que se ha probado más son aquellas en las que la gravedad es extremadamente intensa o, por el contrario, sumamente débil. Los agujeros negros (véase el capítulo 42) son pozos extremadamente profundos en la hoja del espacio-tiempo. Son tan profundos y empinados que cualquier cosa que se acerque lo bastante,

puede caer en su interior, incluso la luz. Señalan agujeros o singularidades en el espacio-tiempo. El espacio-tiempo también se puede curvar en agujeros de gusano o tubos, aunque éstos no han sido observados todavía.

Al otro lado de la escala, donde la gravedad es muy débil, cabría esperar que finalmente se rompiera en minúsculos cuantos, parecidos a la luz, que está formada por bloques constituidos por fotones individuales

Pero nadie ha detectado aún ninguna granulosidad en la gravedad. Las teorías cuánticas de la gravedad están en desarrollo, aunque no cuentan con pruebas que las respalden; la unificación de la teoría cuántica y la gravedad es esquiva. . Esta esperanza mantuvo ocupado a Einstein durante el resto de su carrera, y como no lo consiguió, este desafío sigue aún en pie.

Cronología

1687 d. C.	Newton propone la ley de la gravedad.
1915 d. C.	Einstein publica la teoría general de la relatividad.
1919 d. C.	Las observaciones de un eclipse verifican la teoría de Einstein.
década de 1960 d. C.	Se detecta en el espacio la evidencia de los agujeros negros.

La idea en síntesis: curvatura del espacio-tiempo

42. Agujeros negros

Caer en un agujero negro no sería muy agradable: sus miembros se partirían por la mitad y a sus amigos les parecería todo el rato que se congela en el tiempo mientras cae. En un principio se creyó que los agujeros negros eran estrellas congeladas, cuya velocidad de escape excede la de la luz, pero actualmente se consideran agujeros o «singularidades» en la hoja del espacio-tiempo de Einstein. No sólo imaginarios, los agujeros negros gigantes existen en el centro de las galaxias, incluida la nuestra, y otros más pequeños se encuentran diseminados por el espacio como fantasmas de estrellas muertas.

Si tiramos una pelota al aire, alcanza una cierta altura y luego vuelve a caer. Cuanto más rápido la lanzamos, más alto llega. Si la arrojamos lo bastante rápido podría escapar de la gravedad terrestre y dirigirse a toda velocidad hacia el espacio. La velocidad necesaria para lograr esto, llamada «velocidad de escape», es de 11 km/s (o sea, unos 40.000 km/hora).

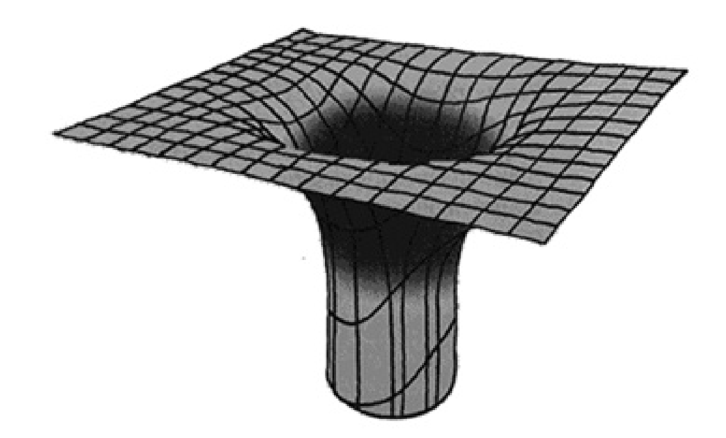
«Dios no sólo juega a los dados, sino que a veces los tira donde no podemos verlos.» Stephen Hawking, 1977

Un cohete necesita alcanzar esta velocidad si quiere despegar de la Tierra. La velocidad de escape es menor si se encuentra en la Luna, que es más pequeña: con 2,4 km/s es suficiente. Pero si se encuentra en un planeta con una masa mucho mayor, entonces la velocidad de escape aumenta. Si el planeta fuera lo bastante pesado, la velocidad de escape podría alcanzar o exceder la propia velocidad de la luz y aun así ni siquiera la luz podría escapar a su atracción gravitacional. Un objeto de estas características, tan masivo y denso que ni siquiera la luz puede escapar de él, es un agujero negro.

Horizonte de sucesos

La idea del agujero negro fue desarrollada en el siglo XVIII por el geólogo John Michell y el matemático Pierre-Simon Laplace. Más adelante, después de que

Einstein propusiera sus teorías de la relatividad, Karl Schwartzschild calculó cómo sería un agujero negro. En la teoría de la relatividad general de Einstein, el espacio y el tiempo están unidos, y ambos se comportan juntos como una enorme hoja de goma. La gravedad distorsiona la hoja de acuerdo con la masa de un objeto. Un planeta pesado descansa en una depresión del espacio-tiempo y su atracción gravitatoria es equivalente a la fuerza percibida al rodar hacia la depresión, tal vez curvando su trayectoria o incluso atrayéndolo hacia su órbita.



Entonces, ¿qué es un agujero negro? Es una fosa tan profunda y empinada que cualquier objeto que se aproxime a él lo suficiente caerá directamente en su interior y jamás podrá salir. Es un agujero en la hoja del espacio-tiempo, como una canasta de baloncesto.

Si pasamos lejos del agujero negro, nuestra trayectoria puede curvarse hacia él, aunque sin llegar a caer en su interior. Pero si pasamos demasiado cerca, caeremos en una espiral que nos arrojará a su interior. Pero si pasamos demasiado cerca, caeremos en una espiral que nos arrojará a su interior. La misma suerte correrá un fotón de luz. La distancia crítica que delimita estos dos desenlaces se denomina «horizonte de sucesos». Cualquier cosa que se encuentre dentro del horizonte de sucesos caerá en picado en el agujero negro, incluyendo la luz.

Caer en un agujero negro ha sido descrito como convertirse en un espagueti. Como los laterales son tan empinados, en el interior del agujero negro existe un gradiente de gravedad muy fuerte. Si metiéramos primero un pie, cosa que esperamos jamás ocurra, entonces nuestros pies serían atraídos más que la cabeza, y por tanto

nuestro cuerpo se estiraría como si estuviera en un potro de tortura. A eso hay que añadirle un movimiento giratorio cualquiera y seremos engullidos como un chicle en un plato de espaguetis. No es una forma agradable de irse. Algunos científicos se han preocupado tratando de proteger a alguna persona desgraciada que pudiera caer accidentalmente en un agujero negro. Parece ser que una forma de protegernos es ponernos un anillo salvavidas de plomo. Si el anillo fuera lo bastante pesado y denso, contrarrestaría el gradiente de la gravedad y preservaría a esa persona, y su vida.

Evaporación

Por extraño que parezca, los agujeros negros al final se evaporan. En los años setenta, Stephen Hawking sugirió que los agujeros negros no son completamente negros, sino que irradian partículas debido a efectos cuánticos. De este modo, la masa se va perdiendo gradualmente y el agujero negro se va encogiendo hasta que desaparece. La energía del agujero negro crea incesantemente pares de partículas y antipartículas correspondientes. Si esto sucede cerca del horizonte de sucesos, en ocasiones alguna de las partículas podría escapar aunque la otra caiga en su interior. Para un observador externo, el agujero negro emite partículas, lo que se denomina radiación de Hawking. Esta energía irradiada hace que el agujero vaya menguando. Esta idea se basa aún en la teoría, y nadie sabe a ciencia cierta qué ocurre en un agujero negro. El hecho de que sean relativamente comunes sugiere que este proceso tarda un tiempo muy largo, así que los agujeros negros continúan al acecho.

Estrellas congeladas

El término «agujero negro» fue acuñado en 1967 por John Wheeler como una alternativa más fácil de recordar para describir una estrella congelada. Las estrellas congeladas fueron predichas en la década de 1930 en las teorías de Einstein y Schwartzschild. A causa del extraño comportamiento del espacio y el tiempo cerca

del horizonte de sucesos, la materia incandescente que caía en él parecía disminuir de velocidad como así sucede en realidad, debido a que las ondas lumínicas tardan cada vez más tiempo en alcanzar al observador. Cuando traspasa el horizonte de sucesos, este observador externo observa cómo el tiempo realmente se detiene de tal forma que el material parece congelarse en el momento de cruzar el horizonte. Por esta razón fueron predichas las estrellas congeladas, que se congelan justo en el instante de colapsarse en el horizonte de sucesos. El astrofísico Subrahmanyan Chandrasekhar predijo que las estrellas que tuvieran una masa superior a 1,4 veces la del Sol finalmente se colapsarían en un agujero negro; sin embargo, debido al principio de exclusión de Pauli (véase Capítulo 30) ahora sabemos que las enanas blancas y las estrellas de neutrones se sostienen solas por medio de la presión cuántica, de modo que los agujeros negros tienen que tener una masa tres veces superior a la masa solar para formarse. Las evidencias de las estrellas congeladas o agujeros negros no aparecieron hasta los años sesenta.

Si los agujeros negros succionan la luz, ¿cómo podemos verlos para detectar su presencia? Hay dos maneras. En primer lugar, se pueden observar debido a su forma de atraer a otros objetos hacia ellos. Y en segundo lugar, cuando el gas cae en su interior, se calienta y resplandece antes de desaparecer. El primer método se ha utilizado para identificar un agujero negro que acecha en el centro mismo de nuestra propia galaxia. Se ha observado que las estrellas que pasan cerca de él lo hacen a gran velocidad y que son despedidas hacia el exterior en órbitas alargadas. El agujero negro de la Vía Láctea tiene una masa de un millón de Soles, comprimida en una región de un radio de tan sólo 10 millones de kilómetros (30 segundos luz), aproximadamente. Los agujeros negros que se encuentran en las galaxias reciben el nombre de agujeros negros supermasivos. No sabemos cómo se forman, pero parecen afectar al modo en que las galaxias crecen, así que podrían llevar ahí desde el primer día o quizá haberse desarrollado a causa del colapso de millones de estrellas en un punto.

«Los agujeros negros de la naturaleza son los objetos microscópicos más perfectos del universo: los únicos elementos que intervienen en su formación son nuestros conceptos de espacio y tiempo.» Subrahmanyan Chandrasekhar, 1983

Agujeros de gusano

¿Qué hay en el fondo de un agujero negro en la hoja del espacio-tiempo? Supuestamente tienen un final puntiagudo o a lo mejor son auténticos agujeros, perforaciones en la hoja. Pero los teóricos se han preguntado qué sucedería si se unieran a otro agujero negro. Podemos imaginarnos dos agujeros negros cercanos como largos tubos que penden de la hoja del espacio-tiempo. Si los tubos se unen, cabe imaginar que se formará un tubo o agujero de gusano entre las dos bocas de cada agujero negro. Armado con su «salvavidas» podría lograr saltar en un agujero negro y salir por el otro. Esta idea ha sido muy utilizada en la ciencia ficción para el transporte por el tiempo y el espacio. El agujero de gusano podría conducir a un universo totalmente diferente. Las posibilidades de modificar el universo son infinitas, pero no olvide su anillo salvavidas.

Cronología

1784 d. C.	Michell deduce la posible existencia de las «estrellas oscuras».
década de 1930 d. C.	Se predice la existencia de estrellas congeladas.
1965 d. C.	Se descubren los quásares.
1967 d. C.	Wheeler renombra a las estrellas congeladas como agujeros negros.
década de 1970 d. C.	Hawking propone que los agujeros negros se evaporan.

La idea en síntesis: trampas de luz

43. La paradoja de Olbers

¿Por qué es oscuro el cielo nocturno? Si el universo fuera infinito y hubiera existido siempre, debería ser tan brillante como el Sol, y sin embargo no lo es. Si contemplamos el cielo nocturno vemos toda la historia del universo. El número limitado de estrellas es real e implica que el universo tiene un tamaño y edad limitados. La paradoja de Olbers preparó el camino para la cosmología moderna y el modelo del big bang.

Quizá crea que trazar un mapa del universo entero y representar su historia es difícil y que serán necesarios satélites espaciales muy caros, enormes telescopios en cumbres montañosas remotas o un cerebro como el de Einstein. Pero, en realidad, si sale al exterior en una noche clara puede realizar una observación que será absolutamente tan profunda como la relatividad general. El cielo nocturno es oscuro. Aunque esto es algo que damos por sentado, el hecho de que sea oscuro y no tan brillante como el Sol ya nos dice muchas cosas sobre el universo.

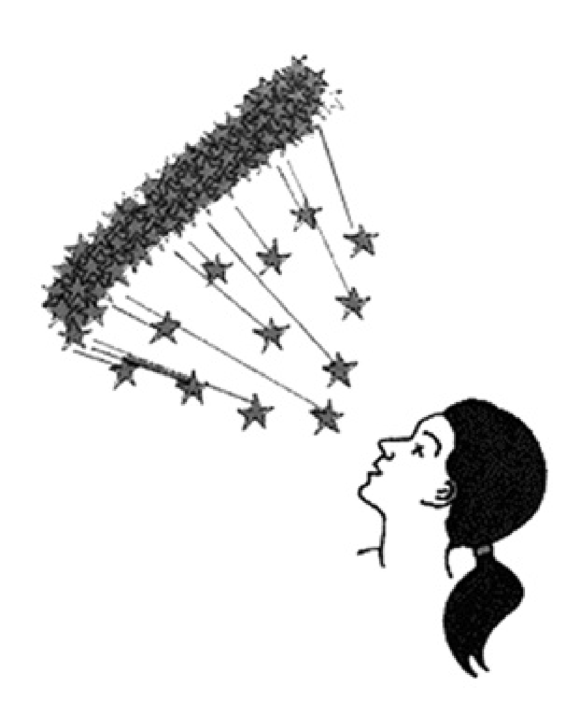
Luz de estrellas, brillo de estrellas

Si el universo fuera infinitamente grande, y se extendiera para siempre en todas direcciones, dondequiera que miráramos veríamos una estrella. Todas las líneas visuales acabarían en la superficie de una estrella. Si nos alejáramos de la Tierra, cada vez habría más estrellas llenando el espacio. Es como mirar a través de un bosque arbolado: de cerca se distinguen los troncos, y parecen más grandes y cercanos de lo que en realidad están, pero cada vez más árboles distantes llenan el campo visual. De modo que si el bosque fuera realmente grande, no se vería el paisaje de más allá. Esto es lo que ocurriría si el universo fuera realmente grande. Aunque las estrellas están mucho más espaciadas que los árboles, finalmente habría suficientes para obstruir toda la vista.

Si todas las estrellas fueran como el Sol, todos los puntos del cielo estarían llenos de luz de estrellas. Aunque una sola estrella lejana es tenue, a esa distancia hay más estrellas. Si sumamos la luz de todas esas estrellas, iluminarán tanto como el

Sol, así que el firmamento nocturno debería ser tan brillante como el Sol.

Obviamente no lo es. La paradoja del cielo nocturno oscuro fue puesta de relieve por Johannes Kepler en el siglo XVII, pero no fue formulada hasta 1823 por el astrónomo alemán Heinrich Olbers. Las soluciones a la paradoja son profundas. Hay varias explicaciones y cada una de ellas tiene algunos elementos de verdad que ahora se comprenden y que han sido adoptados por los astrónomos modernos. Sin embargo, es asombroso que una observación tan simple pueda revelarnos tanto.



Los cielos oscuros

La belleza del oscuro cielo nocturno es cada vez más difícil de apreciar debido al resplandor de las luces de las ciudades. A lo largo de la historia, la gente podía levantar la vista durante las noches claras y observar el eje brillantemente iluminado de las estrellas extendiéndose en el firmamento. Fue bautizado con el nombre de Vía Láctea y ahora sabemos que al mirarlo contemplamos el plano central de nuestra galaxia. Incluso en las ciudades grandes, hace 50 años era posible ver las estrellas más brillantes y la franja de la Vía Láctea, pero hoy en día apenas son visibles unas pocas estrellas, e incluso las vistas del cielo en el campo están bañadas por una

mezcla de humo y niebla amarillenta. La vista que ha inspirado a generaciones antes de nosotros se ha oscurecido. Las principales culpables son las farolas de sodio, especialmente las que derrochan luz al iluminar hacia arriba además de hacia abajo. Grupos de todo el mundo, como la asociación International Dark-Sky, formada por astrónomos, promueven una campaña para frenar la contaminación lumínica con el fin de preservar nuestra visión del universo.

¡Eureka!

Edgar Allan Poe, en su poema en prosa Eureka, de 1848, observaba: «Si la sucesión de estrellas fuera interminable, entonces el fondo del firmamento presentaría una luminosidad uniforme, como la que exhibe la Galaxia, pues no habría absolutamente ningún punto, en todo ese fondo, en el que no existiera una estrella. Por consiguiente, en este estado de cosas, el único modo de comprender los vacíos que nuestros telescopios encuentran en innumerables direcciones, sería suponiendo una distancia del fondo invisible tan inmensa que ningún rayo procedente del mismo ha podido alcanzarnos aún».

El final a la vista

La primera explicación es que el universo no es infinitamente grande. Debe acabar en algún lugar. Así que tiene que haber un número limitado de estrellas en él y no todos los campos de visión encontrarán una estrella. Igualmente, si miramos desde el borde de un bosque o desde un bosque pequeño, podremos ver el cielo más allá.

Otra explicación sería que las estrellas más distantes son inferiores en número, así que aunque se reúnan no darán tanta luz. Como la luz viaja a una velocidad precisa, la luz de las estrellas distantes tarda más en llegar hasta nosotros que la de las más cercanas. La luz del Sol tarda 8 minutos en llegar hasta nosotros, pero desde la estrella más cercana, Alfa Centauri, tarda 4 años, y hasta cien mil años desde las estrellas que se encuentran al otro lado de nuestra propia galaxia. La luz

de la siguiente galaxia más cercana, Andrómeda, tarda 2 millones de años en alcanzarnos; es el objeto más distante que podemos ver únicamente con nuestros ojos. De manera que cuando escudriñamos a lo lejos en el universo, miramos hacia atrás en el tiempo, y las estrellas distantes son más jóvenes que las cercanas. Esto podría ayudarnos con la paradoja de Olbers si esas estrellas jóvenes finalmente fueran más raras que las estrellas parecidas al Sol, las más cercanas. Las estrellas como el Sol viven durante 10.000 millones de años (las más grandes viven menos y las más pequeñas más), así que el hecho de que las estrellas tengan una vida finita también podría explicar la paradoja. Las estrellas dejan de existir antes de un cierto tiempo porque no han nacido aún. Así que las estrellas no han existido siempre.

Hacer que las estrellas lejanas se perciban más débilmente que el Sol también es posible mediante el desplazamiento al rojo. La expansión del universo alarga las longitudes de onda de la luz haciendo que la luz de las estrellas distantes parezca más roja. Así que las estrellas que están a gran distancia parecerán un poco más frías que las cercanas. Esto también podría limitar la cantidad de luz que nos llega de las zonas más lejanas del universo.

Se han postulado ideas aún más absurdas como que la luz distante se bloquea debido al hollín de civilizaciones alienígenas, a agujas de hierro o a un extraño polvo gris. Pero cualquier luz absorbida será irradiada de nuevo en forma de calor y de este modo aparecerá en cualquier otra parte en el espectro. Los astrónomos han analizado la luz del cielo nocturno en todas las longitudes de onda, desde las ondas de radio hasta los rayos gamma, y no han hallado indicios de que la luz estelar visible sea bloqueada.

Un universo promedio

Por lo tanto, la simple observación de que el cielo nocturno es oscuro nos dice que el universo no es infinito. Ha existido tan sólo durante un tiempo limitado, su tamaño es restringido, y las estrellas que contiene no han existido siempre.

La cosmología moderna se basa en estas ideas. Las estrellas más antiguas que vemos tienen aproximadamente una antigüedad de 13.000 millones de años, por lo que sabemos que el universo se debió formar antes de esta época. La paradoja de Olbers sugiere que su edad no puede ser muy superior a ésta o tendríamos que ver

muchas generaciones previas de estrellas, y no es así.

Las galaxias distantes de estrellas son efectivamente más rojas que las cercanas, debido al desplazamiento hacia el rojo, lo cual las hace más difíciles de observar con los telescopios ópticos y confirma que el universo se expande. Las galaxias más lejanas conocidas en la actualidad son tan rojas que se hacen invisibles y sólo pueden detectarse a longitudes de onda infrarrojas. Por lo tanto, todas estas pruebas respaldan la idea del big bang, es decir, que el universo se originó a partir de una explosión gigantesca hace unos 14.000 millones de años.

Cronología

1610 d. C.	Kepler observa que el cielo es oscuro por la noche.
1832 d. C.	Olbers formula la paradoja que lleva su nombre.
1912 d. C.	Vesto Slipher mide el desplazamiento hacia el rojo de las galaxias.

La idea en síntesis: nuestro universo finito

44. La ley de Hubble

Edwin Hubble fue el primero en darse cuenta de que todas las galaxias que están más allá de la nuestra se alejan de nosotros al mismo tiempo. Según la ley de Hubble, cuanto más lejos están, más rápido se alejan. Esta diáspora galáctica fue la primera evidencia de que el universo se expande, un descubrimiento asombroso que cambió nuestra perspectiva del universo entero y de nuestro destino.

La deducción de Copérnico en el siglo XVI de que la Tierra gira alrededor del Sol provocó una gran consternación. Los seres humanos ya no moraban en el centro mismo del cosmos. Pero en la década de 1920, el astrónomo norteamericano Edwin Hubble efectuó una serie de mediciones telescópicas que resultaron aún más inquietantes. Demostró que el universo no era estático, sino que se expandía. Hubble reflejó en un mapa las distancias hasta otras galaxias y su velocidad relativa comparada con nuestra Vía Láctea; descubrió que se retiraban de nosotros a toda velocidad. Éramos tan impopulares desde el punto de vista cósmico que sólo unos pocos vecinos cercanos avanzaban con lentitud hacia nosotros. Cuanto más distante era la galaxia, más rápido se alejaba, siendo su velocidad proporcional a la distancia a la que se encuentra (ley de Hubble). La razón entre la velocidad y la distancia es siempre el mismo número y se denomina constante de Hubble. Actualmente los astrónomos han determinado que su valor se aproxima a unos 75 kilómetros por segundo por megaparsec (un megaparsec, o un millón de parsecs, es equivalente a 3.262.000 años luz o 3×10^{22} m). Por lo tanto, las galaxias se alejan continuamente de nosotros en esta magnitud.

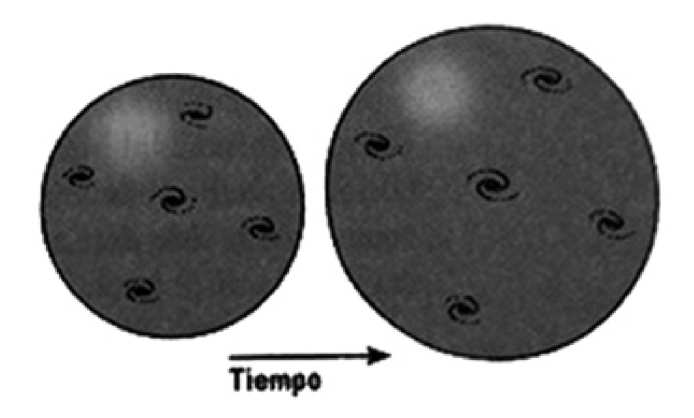
«La historia de la astronomía es una historia de horizontes en retirada.»
Edwin Hubble, 1938

El gran debate

Antes del siglo XX, los astrónomos apenas conocían nuestra propia galaxia, la Vía Láctea. Habían medido cientos de estrellas en su interior, pero también observaron

que estaba salpicada de numerosas manchas tenues, las nebulosas. Algunas de estas nebulosas eran nubes de gas asociadas con el nacimiento y la muerte de las estrellas. Pero unas cuantas parecían diferentes. Algunas tenían forma de espiral u óvalo, lo cual sugería una regularidad mayor que la de una nube.

En 1920, dos famosos astrónomos sostuvieron un debate sobre el origen de esas manchas. Harlow Shapley argumentaba que todo lo que había en el cielo formaba parte de la Vía Láctea, la cual constituía la totalidad del universo. En el otro extremo, Herber Curtis proponía que algunas de estas nebulosas eran «universos aislados» independientes o «universos» externos ajenos a la Vía Láctea.



El término «galaxia» fue acuñado más tarde para describir estos universos de nebulosas. Ambos astrónomos citaban pruebas para respaldar sus respectivas ideas, y el debate no se resolvió en un día. El trabajo posterior de Hubble demostró que el punto de vista de Curtis era correcto. Estas nebulosas en espiral eran realmente galaxias externas y no se encontraban en la Vía Láctea. El universo se abría repentinamente en un inmenso panorama.

Volar por los aires

Hubble utilizó un telescopio Hooker de 254 cm en el Monte Wilson para medir la luz parpadeante de las estrellas de la nebulosa de Andrómeda, que según sabemos actualmente es una galaxia espiral muy similar a la Vía Láctea, y también una hermana del grupo de galaxias que se asocian con nosotros. Estas estrellas parpadeantes se denominan estrellas variables Cefeidas, por el prototipo de estrella

descubierto en la constelación de Cefeo, y aún hoy constituyen inestimables fuentes de información sobre las distancias. La cantidad y la frecuencia del parpadeo aumentan en proporción a la luminosidad intrínseca de la estrella, así que una vez que sabemos cómo varía su luz sabemos lo brillante que es. Conociendo su luminosidad se puede calcular la distancia a la que se encuentra, pues aquélla se debilita con la distancia. Ocurre lo mismo que cuando observamos una bombilla colocada a una cierta distancia, y sabemos que su potencia es de 1.000 vatios, y luego calculamos la distancia a la que se encuentra comparando su luminosidad con una bombilla de 100 vatios que tenemos enfrente.

El telescopio espacial Hubble

El telescopio espacial Hubble es con toda seguridad el observatorio estelar más popular de todos los tiempos. Sus increíbles fotografías de nebulosas, galaxias distantes y discos alrededor de las estrellas han embellecido las portadas de muchas publicaciones durante casi 20 años. Lanzado en 1990 desde la lanzadera espacial Discovery, la unidad tiene el tamaño de un autobús de dos pisos, 13 m de longitud, 4 m de ancho y un peso de 11.000 kg. Está provisto de un telescopio astronómico cuyo espejo es de 2,4 m de ancho, y de una batería de cámaras y detectores electrónicos capaces de tomar imágenes claras y cristalinas, en frecuencias de luz visible, ultravioleta e infrarroja. La potencia del Hubble reside en el hecho de que se encuentra por encima de la atmósfera, de modo que sus fotografías no son borrosas. Ahora que ha envejecido, el destino del Hubble es incierto. La NASA puede optar por actualizar su instrumental, aunque eso requeriría un transbordador tripulado por un equipo, o bien puede concluir su programa y rescatar la nave para la posteridad o estrellarla de forma segura en el océano.

De esta forma Hubble midió la distancia hasta la galaxia Andrómeda. Estaba mucho más lejos que lo que mide nuestra Vía Láctea, tal y como había sido determinado por Shapley, así que debía de estar fuera de ella. Este hecho tan simple fue

revolucionario. Significaba que el universo era inmenso y que estaba lleno de otras galaxias iguales que la Vía Láctea.

A continuación, Hubble se dispuso a recoger en un gráfico las distancias a otras muchas galaxias. También descubrió que la luz en ellas estaba en su mayor parte desplazada hacia el rojo en una proporción que aumentaba con la distancia. El desplazamiento hacia el rojo es similar al desplazamiento Doppler de un objeto giratorio (véase Capítulo 19). Descubrir que las frecuencias de la luz, como las transiciones atómicas del hidrógeno, eran todas más rojas de lo esperado significaba que esas galaxias se alejaban a toda velocidad de nosotros. Era muy extraño que todas las galaxias se alejaran velozmente, y que sólo las «locales» se movieran hacia nosotros. Cuanto más lejos mirábamos, más rápidamente se retiraban. Hubble observó que las galaxias no se alejaban simplemente de nosotros, lo que habría convertido nuestra posición en el universo en un lugar privilegiado. En lugar de eso, se alejaban a toda velocidad unas de otras. Hubble llegó a la conclusión de que el propio universo se expandía, inflándose como un globo gigante. Las galaxias son como puntos en el globo, y se apartan unas de otras a medida que el aire entra en él.

«Las encontramos más pequeñas y débiles, en un número siempre creciente, y sabemos que llegamos al espacio, cada vez más lejos; hasta que, en la nebulosa más tenue que se puede detectar con el mayor de los telescopios, llegamos a la frontera del universo conocido.» Edwin Hubble, 1938

¿Cuán lejos y cuán rápido?

Incluso los astrónomos actuales utilizan las estrellas variables Cefeidas para trazar un mapa de la expansión local del universo. Medir la constante de Hubble con exactitud ha sido un paso muy importante. Para hacerlo, hay que saber lo lejos que está algo y conocer su velocidad o desplazamiento hacia el rojo. Los desplazamientos hacia el rojo son sencillos de medir en el espectro atómico. La frecuencia de una transición atómica particular en la luz de una estrella se puede comprobar en el laboratorio en relación con su frecuencia de onda conocida; la

diferencia nos da su desplazamiento hacia el rojo. Las distancias son más difíciles de determinar porque hace falta observar algo en la distante galaxia, ya sea porque su verdadera longitud es conocida o porque lo es su verdadera luminosidad, una «candela estándar».

Hay diversos métodos para inferir las distancias astronómicas. Las estrellas Cefeidas funcionan con las galaxias cercanas cuando se pueden separar las estrellas individuales. Pero en distancias más largas hacen falta otras técnicas. Las diferentes técnicas se pueden unir una tras otra para constituir una barra medidora gigante o «escalera de distancias». Pero como cada método tiene sus propias peculiaridades, todavía hay muchas incertidumbres acerca de la exactitud de la escalera extendida.

Actualmente, se conoce la constante de Hubble con una precisión de aproximadamente el 10%, en gran medida gracias a las observaciones de las galaxias por medio del telescopio espacial Hubble y a la radiación de microondas del fondo cósmico. La expansión del universo se inició con el big bang y desde entonces las galaxias han ido alejándose. La ley de Hubble establece un límite para la edad del universo. Como está en continua expansión, si nos remontamos hasta su punto de partida, podemos calcular cuándo se produjo. El resultado se cifra en alrededor de 14.000 millones de años.

Cronología

1918 d. C.	Vesto Slipher mide el desplazamiento hacia el rojo de las nebulosas.
1920 d. C.	Shapley y Curtis discuten el tamaño de la Vía Láctea.
1922 d. C.	Alexander Friedmann publica el modelo del big bang.
1924 d. C.	Se descubren las estrellas variables Cefeidas.
1929 d. C.	Hubble y Milton Humason descubren la ley de Hubble.

La idea en síntesis: el universo en expansión

45. El big bang

El nacimiento del universo en una explosión fenomenal originó todo el espacio, la materia y el tiempo tal y como los conocemos. Pronosticado en las matemáticas de la relatividad general, encontramos evidencias del big bang en la precipitada retirada de galaxias que se alejan de la nuestra, en la cantidad de elementos ligeros del universo y en el resplandor de microondas que llena el cielo.

El big bang es la explosión última, el nacimiento del universo. Si miramos a nuestro alrededor hoy en día, vemos indicios de que nuestro universo se expande y podemos inferir que en el pasado debió de ser más pequeño y más caliente. Llevando esto a su conclusión lógica, significa que el cosmos entero se habría originado a partir de un único punto. En el momento de la ignición, el espacio, el tiempo y la materia fueron creados simultáneamente en una bola de fuego cósmico. Muy gradualmente, durante 14.000 millones de años, esta densa y caliente nube fue aumentando y enfriándose. Finalmente se fragmentó hasta dar origen a las estrellas y galaxias que actualmente salpican el cielo.

No es broma

La propia expresión de «big bang» fue realmente acuñada en tono de broma. El eminente astrónomo británico Fred Hoyle creía absurdo que todo el universo hubiera surgido a partir de una sola semilla. En una serie de debates retransmitidos por primera vez en 1949 se burló de la exagerada proposición del matemático belga Georges Lemaître, quien había propuesto esta solución. Hoyle prefería creer en una visión más sostenible del cosmos. En su universo en perpetuo «estado estacionario», la materia y el espacio se creaban y se destruían continuamente, y por tanto éste debía haber existido durante un tiempo ilimitado. Aun así, las pruebas empezaban a acumularse y en los años sesenta la representación estática de Hoyle tuvo que ceder, ante el peso de la evidencia que favorecía al big bang.

El universo en expansión

El éxito del modelo del big bang se cimenta en tres observaciones críticas. La primera es que la mayoría de las galaxias se alejan de la nuestra. Al observarlas desde la distancia, todas las galaxias tienden a apartarse unas de otras como si la fábrica del espacio-tiempo se expandiera y se alargara, siguiendo la ley de Hubble. Una consecuencia del alargamiento es que la luz tarda ligeramente más en llegar hasta nosotros cuando viaja por un universo en expansión que por otro donde las distancias sean fijas. Este efecto se registra como un cambio en la frecuencia de la luz, llamado «desplazamiento hacia el rojo» porque la luz recibida parece más roja de lo que era cuando partió de la lejana estrella o galaxia. Los desplazamientos al rojo se pueden utilizar para inferir las distancias astronómicas.

Elementos ligeros

Justo después del big bang, todo estaba compactado en un caldero sobrecalentado en ebullición. Durante el primer segundo, el universo era tan denso y caliente que ni siquiera los átomos eran estables. A medida que fue creciendo y enfriándose, surgió primero una sopa de partículas, llena de quarks, gluones y otras partículas fundamentales (véase Capítulo 36). Justo un minuto después, los quarks se unieron para formar protones y neutrones. Después, en los tres primeros minutos, la química cósmica combinó los protones y neutrones, de acuerdo con sus números relativos, para formar los núcleos atómicos. Fue entonces cuando se formaron por primera vez los elementos diferentes del hidrógeno por medio de la fusión nuclear. Una vez que el universo se enfrió por debajo del límite de fusión, ya no podían formarse elementos más pesados que el berilio. De modo que inicialmente el universo estaba inundado de núcleos de hidrógeno, helio y trazas de deuterio (hidrógeno pesado), litio y berilio creados en el propio big bang.

«Sintonice en su televisor cualquier canal que no reciba; aproximadamente el 1% de la nieve estática que observa se explica por medio de este antiguo remanente del big bang. La próxima vez que se queje de que no ponen nada en la televisión, recuerde que siempre puede contemplar el nacimiento del universo.». Bill Bryson, 2005

En los años cincuenta Ralph Alpher y George Gamow pronosticaron las proporciones

de los elementos ligeros producidos en el big bang y esta representación básica ha sido confirmada incluso por las mediciones más recientes realizadas en las estrellas de combustión lenta y las nubes de gas primitivo de nuestra Vía Láctea.

El resplandor de microondas

Otro pilar fundamental del big bang es el descubrimiento en 1965 del débil eco del propio big bang. Arno Penzias y Robert Wilson trabajaban en un receptor de radio en el Bell Labs de Nueva Jersey cuando se quedaron asombrados al percibir una débil señal sonora que no lograban eliminar. Parecía haber una fuente extra de microondas procedentes del firmamento, el equivalente a algo a escasos grados de temperatura.

Tras comentarlo con el astrofísico Robert Dicke se dieron cuenta de que su señal coincidía con las predicciones de la luminiscencia del big bang. Habían tropezado con la radiación del fondo cósmico, un mar de fotones que quedó del jovencísimo y caliente universo.

En la teoría del big bang, la existencia de la radiación de fondo había sido predicha en 1948 por George Gamow, Ralph Alpher y Robert Hermann. Aunque los núcleos se sintetizaron en los primeros tres minutos, los átomos no se formaron hasta 400.000 años después. Finalmente, los electrones cargados negativamente se emparejaron con núcleos cargados positivamente para formar átomos de hidrógeno y elementos ligeros. La eliminación de partículas cargadas, que dispersó y bloqueó el camino de la luz, despejó la niebla dando paso a un universo transparente. A partir de entonces, la luz pudo viajar libremente por el universo, permitiéndonos mirar muy lejos hacia atrás.

«En el universo hay un plan coherente, aunque no sé para qué es ese plan.»
Fred Hoyle, 1915-2001

Aunque la bruma del joven universo originalmente estaba caliente (a unos 3.000 kelvin), la expansión del universo ha desplazado hacia el rojo su resplandor de tal forma que actualmente la percibimos a una temperatura inferior a 3 kelvin (tres grados por encima del cero absoluto). Esto fue lo que detectaron Penzias y Wilson.

Por consiguiente, con estos tres importantes fundamentos intactos hasta la fecha, la teoría del big bang es aceptada de forma mayoritaria por los astrofísicos. Unos

cuantos todavía persiguen el modelo del estado estacionario que había fascinado a Fred Hoyle, pero es difícil explicar todas estas observaciones con cualquier otro modelo.

Destino y pasado

¿Qué ocurrió antes del big bang? Como el espacio-tiempo fue creado en él, esta cuestión realmente carece de significado. Sin embargo, los físicos matemáticos reflexionan efectivamente sobre el desencadenante del big bang en un espacio multidimensional a través de las operaciones matemáticas de la teoría M y de la teoría de cuerdas. Estas teorías se centran en la física y en la energía de las cuerdas y las membranas en estas multidimensiones e incorporan ideas de la física de partículas y la mecánica cuántica para tratar de desencadenar ese evento. Estableciendo un paralelismo con las ideas de la física cuántica, algunos cosmólogos también debaten la existencia de universos paralelos.

En el modelo del big bang el universo evoluciona. El destino del cosmos está determinado en gran medida por el equilibrio entre la cantidad de materia que atrae a través de la gravedad y otras fuerzas físicas que lo alejan, incluyendo la expansión. Si la gravedad triunfa, la expansión del universo podría detenerse un día y comenzar a replegarse sobre sí mismo, concluyendo en un rebobinado del big bang, que se conoce como el Big Crunch. Si triunfan la expansión y otras fuerzas repelentes harán alejarse a todas las estrellas, galaxias y planetas y nuestro universo podría acabar siendo un oscuro desierto de agujeros negros y partículas. Finalmente está el «universo bien afinado», en el que las fuerzas de atracción y repulsión están equilibradas, de forma que continúa en expansión aunque pierde velocidad. La cosmología moderan apunta a este final como el más probable.

Cronología

1927 d. C.	Friedmann y Lemaître diseñan la teoría del big bang.
1929 d. C.	Hubble detecta la expansión del universo.
1948 d. C.	Se predice la radiación de microondas del fondo cósmico; Alpher y Gamow calculan la nucleosíntesis del big bang.

1949 d. C.	Hoyle acuña el término «big bang».
1965 d. C.	Penzias y Wilson detectan las microondas de fondo cósmico.
1992 d. C.	El satélite COBE mide las variaciones de las microondas del fondo cósmico.

La idea en síntesis: la explosión final

46. La inflación cósmica

¿Por qué es igual el universo en todas direcciones? ¿Y por qué cuando los rayos de luz paralelos atraviesan el espacio, continúan siendo paralelos de tal forma que vemos estrellas separadas? Creemos que la respuesta es la inflación, la idea de que el universo primigenio fue engullido tan rápidamente en una fracción de segundo que sus irregularidades se alisaron y la expansión posterior equilibró la gravedad con gran exactitud.

El universo en el que vivimos es especial. Cuando lo contemplamos, vemos claramente formaciones de estrellas y galaxias lejanas sin distorsión alguna. Pero fácilmente podría ser de otra manera. La teoría de la relatividad general de Einstein describe la gravedad como una hoja curvada del espacio y el tiempo sobre la cual los rayos de luz retoman el camino por trayectorias curvas (véase Capítulo 41). Por lo tanto, potencialmente, los rayos de luz se podrían mezclar y el universo que vemos aparecería distorsionado, como reflejos en una sala de espejos. Pero en general, aparte de alguna desviación ocasional para sortear una galaxia, los rayos de luz tienden a viajar más o menos en línea recta por el universo. Nuestra perspectiva continúa siendo clara todo el rato hasta el límite visible.

«Se dice que no hay ni una comida gratis. Pero el universo es la comida gratis por excelencia.» Alan Guth, n. 1947

Planicidad

Aunque la teoría de la relatividad concibe el espacio-tiempo como una superficie curvada, los astrónomos a veces describen el universo como «plano», refiriéndose a que los rayos de luz paralelos continúan siendo paralelos al margen de lo lejos que viajen por el espacio, como sucedería si viajaran por un plano llano. El espacio-tiempo se puede representar como una hoja de goma, donde los objetos pesados la deprimen y los demás se hunden en ella, representando la gravedad. En realidad, el espacio-tiempo tiene más dimensiones (al menos cuatro: tres espaciales y una

temporal), aunque son difíciles de imaginar. Tras la explosión del big bang, esta estructura está en continua expansión. La geometría del universo es tal que la hoja casi siempre permanece plana, como la encimera de una mesa, aunque presenta algunos pequeños bultos u hoyos aquí y allá, debido a los patrones de la materia. Por tanto, la trayectoria de la luz por el universo apenas se ve afectada, salvo por algún que otro rodeo alrededor de un cuerpo masivo.

La geometría del universo

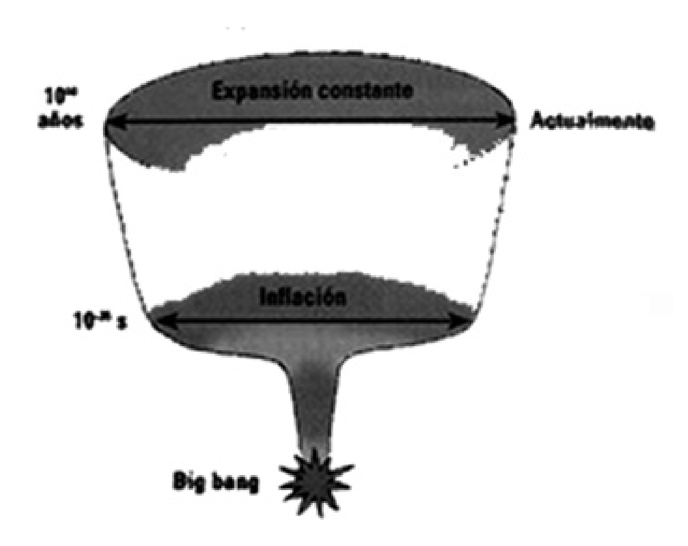
Desde las observaciones más recientes de las microondas del fondo cósmico, como las realizadas por la sonda WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) en 2003 y 2006, los físicos han logrado medir la forma del espacio-tiempo de un extremo a otro del universo. La comparación del tamaño de las zonas calientes y frías en el cielo de microondas con las longitudes pronosticadas para ellas en la teoría del big bang, demostró que el universo es «plano». Incluso durante un viaje por todo el universo que durara miles de millones de años, los rayos de luz que parten en paralelo continuarían siendo paralelos.

Si hubiera demasiada materia, toda la hoja se hundiría y finalmente se doblaría sobre sí misma, invirtiendo la expansión. En este escenario, los rayos de luz inicialmente paralelos finalmente convergerían en un punto. Si la materia fuera excesivamente escasa para deprimirla, la hoja del espacio-tiempo se alargaría y llegaría a romperse. Los rayos de luz paralelos divergirían al atravesarla. Sin embargo, nuestro universo real se encuentra en algún punto medio, con la suficiente materia para mantener unida la estructura del universo al tiempo que se expande continuamente. Por lo tanto, el universo parece estar en perfecto equilibrio (véase el recuadro).

Monotonía

Otra característica del universo es que tiene prácticamente el mismo aspecto en todas direcciones. Las galaxias no se concentran en un punto, sino que están

diseminadas en todas direcciones. Esto quizá no resulta demasiado sorprendente a primera vista, pero es inesperado. El universo es tan grande que es un misterio cómo se han podido comunicar sus extremos opuestos, ni siquiera a la velocidad de la luz. Después de existir durante 14.000 millones de años, el tamaño del universo es superior a 14.000 millones de años luz de un extremo a otro.



De modo que, aunque la luz viaja a la máxima velocidad alcanzable por cualquier señal transmitida, no ha tenido tiempo de llegar de un extremo al otro. Entonces, ¿cómo sabe un extremo del universo el aspecto que tiene el otro? Éste es el «problema del horizonte», en el cual el «horizonte» es la máxima distancia a la que ha viajado la luz desde el nacimiento del universo, trazando una esfera iluminada. Por tanto, hay regiones en el espacio que no podemos, ni nunca podremos ver, puesto que la luz de allí aún no ha tenido tiempo de llegar hasta nosotros.

Suavidad

El universo es también bastante suave. Las galaxias están dispuestas de una forma bastante uniforme en el cielo. Si entrecerramos los ojos, muestran un brillo uniforme en lugar de agruparse en unas cuantas grandes zonas. Nuevamente, no tendría que haber sido así. Las galaxias han crecido con el tiempo debido a la gravedad. Empezaron siendo un simple punto con una densidad ligeramente excesiva en el gas que quedó del big bang.

Ese punto comenzó a colapsarse a causa de la gravedad, formando estrellas y finalmente una galaxia. Las semillas originalmente superdensas de las galaxias se abrieron debido a los efectos cuánticos, cambios minúsculos en la energía de las partículas en el caliente universo embrionario. Pero podrían haberse desarrollado para formar grandes zonas de galaxias, como la piel de una vaca, diferente del mar homogéneo que observamos. En la distribución de la galaxia, encontramos un gran número de montículos en lugar de unas pocas cordilleras gigantescas.

Pegar el estirón

Los problemas de la planicidad, el horizonte y la suavidad del universo se pueden resumir en una idea: inflación. La inflación fue desarrollada en 1981 por el físico americano Alan Guth, a modo de solución. El problema del horizonte, que el universo parece igual en todas direcciones aunque es demasiado grande para que lo sepamos, implica que el universo debió de ser en algún momento tan pequeño que la luz se podía comunicar entre todas sus regiones. Como ya no es así, debe haberse inflado con gran rapidez hasta alcanzar el universo proporcionalmente mayor que actualmente vemos. Pero este período de inflación se habrá producido extraordinariamente rápido, a una velocidad muy superior a la de la luz. La rápida expansión, doblándose en tamaño y volviéndose a doblar en una fracción de segundo, igualó las ligeras variaciones de densidad imprimidas por las fluctuaciones cuánticas, como sucede con el patrón estampado de un globo que se infla, que se va desdibujando. Por tanto, el universo se suavizó. El proceso inflacionario también estableció el equilibrio posterior entre la gravedad y la expansión final, procediendo después a un ritmo mucho más pausado. La inflación tuvo lugar casi inmediatamente después de la bola de fuego del big bang (10^{-35} segundos después).

«Es realmente fantástico darse cuenta de que las leyes de la física pueden describir cómo todo se creó en una fluctuación cuántica aleatoria a partir de la nada, y cómo durante 15.000 millones de años la materia ha podido organizarse en formas tan complejas como las que tenemos aquí y ahora, seres humanos que hablan, que actúan de un modo intencionado.» Alan Guth, n. 1947

La inflación todavía no se ha demostrado y su causa última no se comprende del todo bien —hay tantos modelos como teóricos—, pero su comprensión será el objetivo de la siguiente generación de experimentos cosmológicos, incluyendo la producción de mapas más detallados de la radiación de microondas del fondo cósmico y su polarización.

Cronología

1981 d. C.	Guth propone la inflación.
1992 d. C.	El satélite COBE (COsmic Background Explorer) detecta zonas calientes y frías y mide su temperatura.
2003 d. C.	La sonda WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Porbe) dibuja un mapa de la radiación de microondas del fondo cósmico.

La idea en síntesis: el estirón cósmico

47. La materia oscura

El 90% de la materia del universo no brilla, sino que es oscura. La materia oscura es detectable por su efecto gravitacional, pero apenas interactúa con las ondas de luz o la materia. Los científicos piensan que podría presentarse en forma de MACHO, estrellas fallidas y planetas gaseosos, o WIMP, partículas subatómicas exóticas: la caza de la materia oscura es la frontera desconocida de la física.

La denominación materia oscura suena exótica y quizá lo sea, pero su definición es bastante realista. La mayoría de las cosas que vemos en el universo brillan porque irradian o reflejan luz. Las estrellas centellean produciendo fotones en grandes cantidades, y los planetas brillan reflejando la luz solar. Sin esa luz, sencillamente no los veríamos. Cuando la luna pasa por la sombra de la Tierra es oscura; cuando las estrellas se extinguen dejan rastros demasiado tenues para ser vistos; incluso un planeta tan grande como Júpiter sería invisible si vagara libremente lejos del Sol. Así que quizá no es tan sorprendente que gran parte de la materia del universo no brille. Es la materia oscura.

El lado oscuro

Aunque no podemos ver directamente la materia oscura, podemos detectar su masa a través de su atracción gravitatoria sobre otros objetos astronómicos y también sobre los rayos de luz. Si no supiéramos que la Luna está ahí, todavía podríamos inferir su presencia debido a la atracción de su gravedad y al ligero cambio en la órbita terrestre. Incluso hemos utilizado un temblor inducido por la gravedad aplicado a una estrella progenitora para descubrir planetas alrededor de estrellas lejanas.

En los años treinta, el astrónomo suizo Fritz Zwicky observó que un cúmulo gigante de galaxias cercanas se comportaba como si su masa fuera mucho mayor que el peso de todas las estrellas de las galaxias que contenía. Dedujo que la materia total del cúmulo se justificaba en parte como materia luminosa, estrellas brillantes y gas

caliente, y otra parte, que suponía 400 veces la suma de todo lo anterior, a través de cierta materia oscura desconocida. Esta increíble proporción era toda una sorpresa, que implicaba que la mayor parte del universo no estaba formada por estrellas y gas, sino por otra cosa. ¿Qué era esa cosa oscura? ¿Y dónde se escondía?

Distribución de la energía

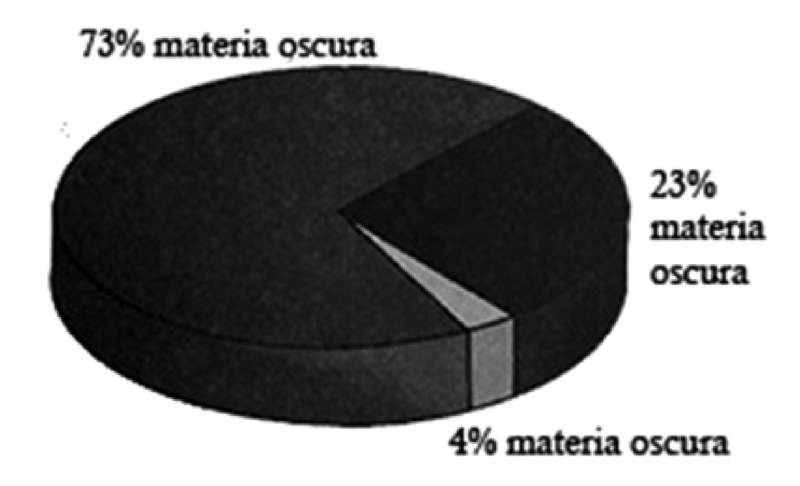
Hoy en día sabemos que aproximadamente sólo el 4% de la materia del universo está formada por bariones (materia normal que comprende protones y neutrones). Otro 23% es materia oscura exótica. Sabemos que no está formada por bariones. Es difícil decir de qué está compuesta, pero podrían ser partículas como los WIMP. El resto de la distribución energética del universo consiste en algo totalmente diferente: energía oscura.

La masa también está ausente de las galaxias individuales espirales. El gas de las regiones más externas gira más rápido de lo debido si la galaxia es tan pesada como la masa total de todas las estrellas que contiene. De modo que, si nos fijamos sólo en la luz, estas galaxias son más masivas de lo esperado. De nuevo, la materia oscura extra tiene que ser cientos de veces más abundante que las estrellas y el gas visibles. La materia oscura no sólo se extiende por todas las galaxias, sino que su masa es tan grande que domina el movimiento de todas las estrellas que alberga en su interior. Es más, la materia oscura se extiende incluso más allá de las estrellas, llenando un «halo» esférico o burbuja alrededor del disco aplanado de cada galaxia espiral.

Aumento de peso

En la actualidad, los astrónomos han dibujado un mapa de la materia oscura, no sólo en las galaxias individuales, sino también en cúmulos de galaxias, que contienen miles de galaxias unidas por su mutua gravedad, y supercúmulos de galaxias, cadenas de cúmulos en una vasta red que se extiende por todo el espacio. La materia oscura aparece siempre que actúa la gravedad a cualquier escala. Si

sumamos toda la materia oscura, descubriremos que hay miles de veces más materia oscura que materia luminosa.



El destino de todo el universo depende de su peso global. La atracción de la gravedad contrarresta la expansión del universo después de la explosión del big bang. Hay tres desenlaces posibles. En primer lugar, el universo es tan pesado que gana la gravedad y finalmente se colapsa sobre sí mismo (un universo cerrado que termina con un gran crujido). En segundo lugar, la materia es demasiado escasa y se expande para siempre (un universo abierto). En tercer lugar, el universo está equilibrado con precisión y la expansión se reduce gradualmente por la acción de la gravedad, pero durante un tiempo tan prolongado que no cesa jamás. Esta última parece la situación más deseable para nuestro universo: tiene precisamente la cantidad adecuada de materia para ralentizar la expansión, aunque sin llegar a detenerla jamás.

WIMP y MACHO

¿De qué está compuesta la materia oscura? En primer lugar, podrían ser nubes oscuras de gas, débiles estrellas o planetas sin luz. Éstos se denominan MACHO o *MAssive Compact Halo Objects* (objetos astrofísicos masivos de halo compacto). La materia oscura también podría estar compuesta por nuevas clases de partículas subatómicas, llamadas WIMP, el acrónimo de *Weakly Interacting Massive Particles* (partículas masivas de interacción débil), las cuales no tendrían prácticamente

ningún efecto sobre el resto de la materia o la luz.

Los astrónomos han detectado MACHO vagando por nuestra propia galaxia. Como los MACHO son muy grandes, similares al planeta Júpiter, pueden observarse individualmente a través de su efecto gravitatorio. Si un gran planeta gaseoso o una estrella fallida pasa frente a una estrella de fondo, su gravedad curva la luz de la estrella a su alrededor. La curvatura centra la luz cuando el MACHO está justo delante de la estrella, de modo que la estrella parece mucho más luminosa durante el instante en que pasa. Este fenómeno se denomina «lente gravitatoria».

«El universo está compuesto principalmente de materia oscura y energía oscura, y no sabemos qué son ninguna de las dos.» Saul Perimutter, 1999

En términos de la teoría de la relatividad, el planeta MACHO distorsiona el espacio-tiempo, como una pelota pesada que deprime la hoja de goma, la cual curva el frente de onda de la luz a su alrededor (véase Capítulo 41). Los astrónomos han buscado esta luminosidad de las estrellas producidas por el paso en primer plano de un MACHO frente a millones de estrellas en el fondo. Han detectado unos cuantos destellos de estas características, pero demasiado pocos para explicar toda la masa ausente de la Vía Láctea.

Los MACHO están formados por materia normal o bariones, compuestos de protones, neutrones y electrones. El límite último de la cantidad de bariones del universo viene dado por el análisis del isótopo del hidrógeno pesado, el deuterio. El deuterio sólo se produjo en el propio big bang, y después ya no ha sido formado por las estrellas, aunque puede arder en su interior. Por lo tanto, al medir la cantidad de deuterio en las nubes inmaculadas de gas en el espacio, los astrónomos pueden estimar el número total de protones y neutrones que se formaron en el big bang porque el mecanismo para fabricar deuterio se conoce con detalle. Esto resulta ser sólo un pequeño porcentaje de la masa del universo entero. Así que el resto del universo tiene que existir de una forma radicalmente diferente, como los WIMP.

La búsqueda de WIMP es actualmente el centro de atención. Como actúan débilmente, estas partículas son intrínsecamente difíciles de detectar. Un candidato es el neutrino. En la última década, los físicos han medido su masa y han

descubierto que puede ser diminuta, aunque no cero. Los neutrinos componen una parte de la masa del universo, pero desde luego no toda. Así es que aún queda sitio para otras partículas exóticas que aguardan a ser descubiertas, algunas nuevas para la física, como los axiones y los fotinos. Llegar a comprender la materia oscura podría arrojar nueva luz sobre el mundo de la física.

Cronología

1933 d. C.	Zwicky mide la materia oscura en el cúmulo de Coma.
1975 d. C.	Vera Rubin muestra que la rotación de las galaxias está afectada por la materia oscura.
1998 d. C.	Se deduce que los neutrinos tienen una masa minúscula.
2000 d. C.	Se detectan los MACHO en la Vía Láctea.

La idea en síntesis: el lado oscuro del universo

48. La constante cosmológica

Einstein afirmó que añadir su constante cosmológica a las ecuaciones de la relatividad general fue su mayor error. El término tenía en cuenta la aceleración o deceleración del ritmo de expansión del universo para compensar la gravedad. Einstein no necesitaba ese número y lo abandonó. Sin embargo, en los años noventa surgieron nuevas evidencias que hicieron necesario reintroducirlo. Los astrónomos descubrieron que la misteriosa energía oscura acelera la expansión del universo, obligando a una revisión de la cosmología moderan.

Albert Einstein pensaba que vivimos en un universo estacionario en lugar de uno con un big bang. Al tratar de escribir las ecuaciones para éste, se encontró con un problema. Si sólo existiera la gravedad, todas las cosas del universo se colapsarían finalmente en un punto, quizá un agujero negro. Obviamente el universo real no era así y parecía estable. Así que Einstein añadió otro término a su teoría para contrarrestar la gravedad, una especie de término «antigravitatorio». Lo introdujo puramente para que sus ecuaciones fueran correctas, no porque conociera tal fuerza. Pero esta formulación se reveló inmediatamente como problemática.

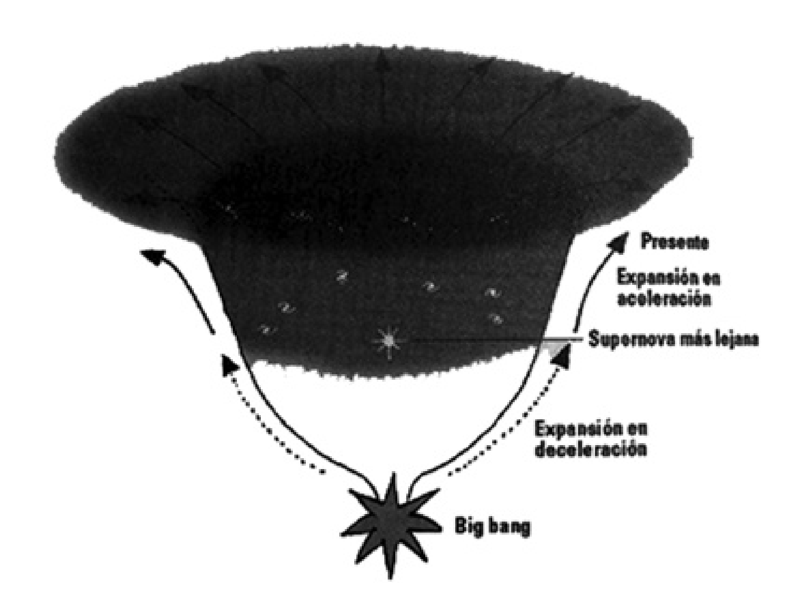
Si hubiera una fuerza opuesta a la gravedad, igual que una gravedad sin límites podría provocar un colapso, la fuerza antigravedad podría con la misma facilidad amplificarse y fragmentar regiones del universo que no estuvieran unidas por la cohesión de la fuerza gravitatoria. En lugar de permitir esta ruptura del universo, Einstein prefirió ignorar su segundo término repulsivo y admitir que había cometido un error al introducirlo. Otros físicos también prefirieron excluirlo, relegándolo para la posteridad. O eso creyeron. El término no fue olvidado, fue conservado en las ecuaciones de la relatividad, pero su valor, la constante cosmológica, fue fijada como cero para descartarlo.

Universo en aceleración

En la década de 1990, dos grupos de astrónomos que dibujaban un mapa de las

supernovas de lejanas galaxias para medir la geometría del espacio, descubrieron que las distantes supernovas parecían más débiles de lo que deberían ser. Las supernovas, brillantes explosiones de estrellas moribundas, se presentan en varios tipos. Las supernovas del tipo Ia tienen una luminosidad predecible y por lo tanto resultan de gran utilidad para inferir las distancias. Igual que las estrellas variables Cefeidas, que se utilizaban para medir las distancias a las galaxias para establecer la ley de Hubble, la luminosidad intrínseca de las supernovas del tipo Ia se puede calcular a partir de su espectro de luz, por lo que es posible determinar lo lejos que se encuentran. Esto no funciona muy bien para las supernovas que están relativamente cerca, pero las supernovas más lejanas eran demasiado débiles. Era como si estuvieran más lejos de nosotros de lo que deberían estar.

«Durante 70 años hemos intentado medir el ritmo al que se desacelera el universo. Finalmente, lo hemos conseguido y descubrimos que se está acelerando.» Michael S. Turner, 2001



A medida que se fueron descubriendo más supernovas, el patrón de debilitamiento ligado a la distancia comenzó a sugerir que la expansión del universo no era constante, como afirmaba la ley de Hubble, sino que era acelerada. Este hecho conmocionó a la comunidad cosmológica y en la actualidad todavía se intenta

esclarecer.

Los resultados aportados por las supernovas encajaban con las ecuaciones de Einstein, pero sólo después de incluir un término negativo aumentando la constante cosmológica de cero a 0,7. Los resultados de las supernovas, interpretados junto con otros datos cosmológicos, como el patrón de la radiación de microondas de fondo, puso de manifiesto la necesidad de que una nueva fuerza repulsiva contrarrestara la gravedad. Pero era una fuerza bastante débil. Continúa siendo un misterio la causa por la que es tan débil, ya que no existe ninguna razón en especial para que no asuma un valor mucho mayor y llegue a dominar por completo el espacio prevaleciendo sobre la gravedad. En lugar de ello, su fuerza es muy próxima a la de la gravedad, de modo que tiene un sutil efecto sobre el espacio-tiempo tal y como lo percibimos en el presente. Este término de energía negativa se ha bautizado como «energía oscura».

«Ésta [la energía oscura] parece ser algo conectado con el propio espacio, y a diferencia de la materia oscura que gravita, tiene un efecto que parece ser el contrario, opuesto a la gravedad, que hace que el universo sea repelido por sí mismo.» Brian Schmidt, 2006

Energía oscura

El origen de la energía oscura continúa siendo esquivo. Todo cuanto sabemos es que es una forma de energía asociada al vacío del espacio libre, que ejerce una presión negativa en las regiones desprovistas de materia que atraiga la gravedad. Así pues, provoca que las regiones del espacio vacío se inflen. Conocemos su fuerza de modo aproximado a partir de las observaciones de las supernovas, pero no sabemos mucho más. No sabemos si realmente es una constante —si siempre adopta el mismo valor en todo el universo y durante todo el tiempo (como ocurre con la gravedad y la velocidad de la luz) —, o si su valor cambia con el tiempo de tal forma que podría tener un valor diferente justo después del big bang por contraste con su valor actual o futuro. En su forma más general, también se ha denominado «quintaesencia» o la quinta fuerza, la cual engloba todas las formas posibles en que su fuerza podría cambiar con el tiempo. Pero todavía no sabemos cómo se manifiesta esta fuerza esquiva o cómo surge en la física del big bang. Es

un tema candente de estudio para los físicos.

Actualmente tenemos un conocimiento mucho mayor de la geometría del universo y de su composición. El descubrimiento de la energía oscura ha ocupado los textos de cosmología, resaltando la diferencia en la distribución de la energía en el universo entero. Ahora sabemos que un 4% es materia bariónica normal, un 23% materia exótica nobariónica y un 73% energía oscura. Estas cifras suman aproximadamente la materia adecuada para el «universo bien afinado» en equilibrio, próximo a la masa crítica donde no es ni cerrado ni abierto.

«Sin embargo, hay que poner el acento en que nuestros datos arrojan una curvatura positiva del espacio, aunque no se introduzca el término suplementario [constante cosmológica]. Ese término sólo es necesario con el propósito de hacer posible una distribución casi estática de la materia.» Albert Einstein, 1918

Sin embargo, las misteriosas propiedades de la energía oscura significan que incluso conociendo la masa total del universo, su comportamiento futuro es difícil de predecir porque depende de si la influencia de la energía oscura aumenta o no en el futuro. Si el universo se acelera, entonces, en ese punto del tiempo, la energía oscura sólo será tan significativa como la gravedad en el control del universo. Pero, en algún punto determinado, la aceleración repuntará y una expansión más rápida superará la gravedad. De modo que el destino del universo quizá sea expandirse para siempre, cada vez más rápido. Se han propuesto algunos escenarios aterradores: una vez que la gravedad sea superada, las estructuras masivas que se mantienen débilmente unidas se desconectarán y se dispersarán, finalmente las propias galaxias se fragmentarán, y las estrellas se evaporarán en una neblina de átomos. En último término, la presión negativa fragmentaría los átomos, dejando tan sólo un sombrío mar de partículas subatómicas.

No obstante, aunque el rompecabezas cosmológico empieza a encajar y hemos medido una gran parte de los números que describen la geometría del universo, todavía quedan muchas cuestiones importantes sin responder. Sin ir más lejos, desconocemos el 95% del contenido del universo, y tampoco sabemos qué es realmente esta nueva fuerza de la quintaesencia. O sea que todavía no ha llegado la hora de dormirse en los laureles. El universo mantiene vivo su misterio.

Cronología

1915 d. C.	Einstein publica la teoría general de la relatividad.
1929 d. C.	Hubble demuestra que el espacio se expande y Einstein abandona su constante.
1998 d. C.	Los datos de las supernovas señalan la necesidad de la constante cosmológica.

La idea en síntesis: la quinta fuerza

49. La paradoja de Fermi

Encontrar vida en cualquier otro lugar del universo sería el mayor descubrimiento de todos los tiempos. Enrico Fermi se preguntaba por qué, dada la edad y la inmensidad del universo, y la presencia de miles de millones de estrellas y planetas que han existido durante miles de millones de años, todavía no nos ha contactado alguna civilización alienígena. Ésta era su paradoja.

Nuestra galaxia contiene miles de millones de estrellas y en el universo hay miles de millones de galaxias, es decir, que hay millones de millones de estrellas. Si tan sólo una fracción de éstas tuvieran planetas anclados, serían muchísimos planetas. Si una fracción de esos planetas albergaran vida, habría millones de civilizaciones en el espacio exterior. Entonces, ¿por qué nunca las hemos visto? ¿Por qué no se han puesto en contacto con nosotros?

Ecuación de Drake

En 1961, Frank Drake escribió una ecuación para calcular la probabilidad de que una civilización extraterrestre contactable habitara en otro planeta de la Vía Láctea. Se conoce como ecuación de Drake. Nos dice que existe la posibilidad de que podamos coexistir con otra civilización, aunque esta probabilidad es aún bastante incierta. En una ocasión, Carl Sagan sugirió que la Vía Láctea podría estar poblada por la asombrosa cantidad de un millón de civilizaciones alienígenas, aunque más tarde rebajó esta cifra y desde entonces otros han estimado que su valor se reduce simplemente a una, es decir, los seres humanos. Más de medio siglo después de que Fermi formulara su pregunta, todavía no hay una respuesta. En la Luna, Marte, los asteroides, los planetas y lunas del sistema solar, no se han hallado indicios concretos de vida de ningún tipo, ni tan siquiera la más simple

«¿Quiénes somos? Descubrimos que vivimos en un planeta insignificante de una aburrida estrella perdida en una galaxia abandonada en un rincón olvidado de un universo en el que hay muchas más galaxias que personas.»
Werner von Braun, 1960

de las bacterias. No hay signos de interferencia en la luz de las estrellas que pudiera indicar máquinas gigantes en órbita que se alimentaran de la energía de aquéllas. Y no será porque nadie haya buscado. Debido a los intereses en juego, se ha concedido una gran atención a la búsqueda de inteligencia extraterrestre.

Búsqueda de vida

Veamos, ¿cómo se pueden buscar signos de vida? En primer lugar, hay que buscar microbios dentro de nuestro sistema solar. Los científicos han analizado rocas procedentes de la Luna, pero están compuestas de basalto inanimado. Se ha sugerido que los meteoritos de Marte podrían hospedar restos de bacterias, pero todavía no se ha demostrado que las burbujas ovoides de esas rocas albergaran vida alienígena y que no resultaran contaminadas tras caer en la Tierra o fueran el resultado de procesos geológicos naturales. Incluso han rastreado las superficies de Marte, los asteroides e incluso una luna en el extremo más alejado del sistema solar: Titán, en la órbita de Saturno.

Pero la superficie de Marte es un árido desierto de arena volcánica y rocas, no muy diferente del desierto de Atacama en Chile. La superficie de Titán es húmeda, empapada de metano líquido, pero hasta la fecha desprovista de vida. Una de las lunas de Júpiter, Europa, se ha intentado vender como el objetivo más popular para futuras búsquedas de vida dentro del sistema solar, pues contiene numerosos mares de agua líquida bajo su superficie helada. Los científicos espaciales están planificando una misión allí para perforar a través de la costra de hielo e inspeccionar debajo. Se han descubierto otras lunas del sistema solar exterior que son bastante activas geológicamente y liberan calor al ser comprimidas y estiradas por la torsión gravitacional de sus órbitas alrededor de los planetas gaseosos gigantes. Por tanto, el agua líquida tal vez no sea un bien tan raro en el sistema solar exterior, alimentando así las expectativas de encontrar vida algún día. Las aeronaves espaciales que viajan a esta región están ampliamente esterilizadas para garantizar que no las contaminamos con extraños microbios terrestres.

La ecuación de Drake

$$N = N_* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times f_L$$

N es el número de civilizaciones de la galaxia Vía Láctea cuyas emisiones electromagnéticas son detectables.
N_* es el número de estrellas de la Galaxia.
f_p es la fracción de esas estrellas que tienen sistemas planetarios.
n_e es el número de planetas por sistema solar, con un entorno apto para la vida.
f_l es la fracción de planetas aptos en los que realmente aparece la vida.
f_i es la fracción de planetas que tienen vida en los cuales surge la vida inteligente.
f_c es la fracción de civilizaciones que desarrollan una tecnología que emite signos detectables de su existencia al espacio.
f_L es la fracción de un periodo vital planetario durante el cual estas civilizaciones emiten señales detectables al espacio (para la Tierra esta fracción es hasta el momento muy reducida).

Pero los microbios no van a llamar a casa. ¿Qué hay de animales o plantas más sofisticados? Ahora que se descubren planetas individuales alrededor de estrellas lejanas, los astrónomos planean diseccionar la luz procedente de éstas para buscar sustancias químicas que puedan apoyar o sugerir la existencia de vida. Se podrían recoger trazas espectrales de ozono o clorofila, pero tendrían que someterse a un análisis minucioso, tales como los que posibilitará la siguiente generación de misiones especiales, como el *Terrestrial Planet Finder* (Buscador de Planetas Terrestres) de la NASA. Estas misiones podrían dar con una hermana Tierra algún día, pero, de ser así, ¿estará poblada de seres humanos, peces o dinosaurios, o simplemente tendrá continentes y mares sin vida?

Contacto

La vida en otros planetas, incluso en los parecidos a la Tierra, podría haber evolucionado de una forma diferente a como lo ha hecho aquí. Por lo tanto, no es

seguro que los alienígenas de otros planetas fueran capaces de comunicarse con nosotros. Desde que la radio y la televisión iniciaron sus emisiones, sus señales se han difundido lejos de la Tierra, viajando hacia el exterior a la velocidad de la luz. Por lo tanto, la Tierra ha emitido numerosas señales, si se dispone de una antena para captarlas. ¿No harían lo mismo otras civilizaciones? Los radioastrónomos rastrean estrellas cercanas en busca de indicios de señales anormales.

El espectro de las ondas de radio es muy amplio, así que se centran en frecuencias próximas a las transiciones de clave de energía natural, como la del hidrógeno, que debería ser la misma en cualquier punto del universo. Buscan transmisiones que sean regulares o estén estructuradas, pero que no sean efectuadas con ningún objeto astronómico conocido. En 1967, la estudiante graduada Jocelyn Bell tuvo un gran susto en Cambridge, Inglaterra, al descubrir pulsos regulares de ondas de radio procedentes de una estrella. Algunos pensaron que esto era efectivamente un código Morse alienígena, pero de hecho era un nuevo tipo de estrella de neutrones que giraba, que actualmente denominamos pulsar. Como el proceso de rastreo de miles de estrellas tarda mucho tiempo, en Estados Unidos se ha puesto en marcha un programa especial llamado SETI (*Search for Extra Terrestrial Intelligence*, Búsqueda de Inteligencia Extraterrestre). A pesar de que hace años que se analizan datos, todavía no se ha detectado ninguna señal extraña. Otros radiotelescopios buscan de forma ocasional, pero éstos tampoco han descubierto nada que no fuera de origen mundano.

«Nuestro Sol es una de las 100.000 millones de estrellas de nuestra galaxia. Nuestra galaxia es una de las miles de millones de galaxias que pueblan el universo. Sería el colmo de la presunción pensar que somos los únicos seres vivientes de esa enorme inmensidad.» Carl Sagan, 1980

Hemos salido a comer

Teniendo en cuenta que hemos ideado numerosas formas de comunicar y detectar signos de vida, ¿por qué no responde ninguna civilización a nuestras llamadas? Tal vez la vida sólo existe durante un período de tiempo muy corto en un estado avanzado en el que es posible la comunicación. ¿Por qué ocurriría esto? Quizá la

vida inteligente siempre se aniquila a sí misma muy deprisa. O quizá es autodestructiva y no sobrevive lo suficiente, así que las posibilidades de comunicarse son efectivamente muy escasas. A lo mejor hay escenarios más paranoicos: los alienígenas simplemente no quieren contactar con nosotros y estamos deliberadamente aislados. O están tan ocupados que todavía no han tenido la ocasión.

Cronología

1950 d. C.	Fermi cuestiona la ausencia de contacto alienígena.
1961 d. C.	Drake diseña su ecuación.
1996 d. C.	Los meteoritos de la Antártida apunta a una vida primitiva en Marte.

La idea en síntesis: ¿hay alguien ahí?

50. El principio antrópico

El principio antrópico afirma que el universo es como es porque si fuera diferente no estaríamos aquí para verlo. Es una explicación de la razón por la cual todos los parámetros de la física adoptan el valor que tienen, desde la magnitud de las fuerzas nucleares hasta la energía oscura y la masa del electrón. Si cualquiera de ellos variara aunque fuera ligeramente, el universo sería inhabitable.

Si la fuerza nuclear fuerte fuera ligeramente diferente, los protones y neutrones no se unirían para formar núcleos, y los átomos no podrían formarse. La química no existiría. El carbono sería inexistente y, por tanto, la biología y los seres humanos no existirían. Si no existiéramos, ¿quién «observaría» el universo y evitaría que existiera sólo como una sopa cuántica de probabilidad?

Igualmente, si los átomos existieran y el universo hubiera evolucionado hasta formar todas las estructuras que conocemos en la actualidad, si la energía oscura fuera un poco más fuerte, las galaxias y las estrellas se estarían haciendo pedazos. Por tanto, minúsculos cambios en los valores de las constantes físicas, en la magnitud de las fuerzas o de las masas de las partículas, pueden tener implicaciones catastróficas. Dicho de otro modo, el universo está bien afinado. Todas las fuerzas son «correctas» para que la humanidad se haya desarrollado. ¿Es un suceso fortuito que estemos viviendo en un universo de 14.000 millones de años, en el que la energía oscura y la gravedad se equilibran mutuamente, y las partículas subatómicas adoptan las formas que tienen?

Exactamente así

En lugar de pensar que la humanidad es muy especial y que el universo entero existe sólo para nosotros, una suposición un tanto arrogante, el principio antrópico explica que esto no es ninguna sorpresa. Si cualquiera de las fuerzas fuera ligeramente diferente, sencillamente no estaríamos aquí para ser testigos. Igual que el hecho de que hay muchos planetas, pero hasta la fecha sólo uno tiene las condiciones adecuadas para que se desarrolle la vida, el universo podría haberse

formado de múltiples maneras, pero sólo hemos llegado a existir a través de ésta. Igualmente, si mis padres no se hubieran conocido jamás, si el motor de combustión no hubiera sido inventado, y en esa fecha, y mi padre no pudiera haber viajado al norte para conocer a mi madre, yo no estaría aquí. Esto no significa que todo el universo evolucionara así sólo para que yo pudiera existir. Pero el hecho de que yo exista requiere en última instancia, entre otras cosas, que se inventara el motor con antelación y eso limita la gama de universos en los que yo podría encontrarme.

«Los valores observados de todas las cantidades físicas y cosmológicas no son igualmente probables, sino que adoptan valores restringidos según el requisito de que existen sitios donde la vida basada en el carbono puede desarrollarse y… que el Universo sea lo bastante viejo para que ya lo haya hecho.» John Barrow y Frank Tipler, 1986

El principio antrópico fue utilizado como argumento en física y cosmología por Robert Dicke y Brandon Carter, aunque su argumentación es familiar para los filósofos. Una de las formulaciones, el principio antrópico débil, afirma que si los parámetros fueran diferentes no estaríamos aquí, así que el hecho de que existamos reduce las propiedades de universos físicos inhabitables en los que podríamos encontrarnos. Otra versión más fuerte enfatiza la importancia de nuestra propia existencia, tal que la vida es un resultado necesario para que el universo naciera. Por ejemplo, se necesitan observadores para concretar un universo cuántico mediante la observación del mismo. John Barrow y Frank Tipler también sugirieron otra versión, a través de la cual el procesamiento de la información es un propósito fundamental del universo y por ello su existencia debe producir criaturas capaces de procesar información.

Muchos mundos

Para crear a los seres humanos, hace falta que el universo sea viejo, de manera que el carbono tenga tiempo suficiente para formarse en las primeras generaciones de estrellas, y las fuerzas nucleares fuerte y débil tienen que ser «exactamente así» para hacer posible la física nuclear y la química. La gravedad y la energía oscura

también tienen que estar en equilibrio para formar las estrellas en lugar de hacer añicos el universo. Además, las estrellas necesitan ser longevas para permitir que se formen los planetas y lo bastante grandes para poder encontrarnos en un bonito planeta templado de las afueras que tenga agua, nitrógeno, oxígeno y todas las demás moléculas necesarias para dar origen a la vida.

Burbujas antrópicas

Podemos evitar el dilema antrópico si muchos universos paralelos o universos burbuja acompañan a éste en el que vivimos. Cada universo burbuja puede adoptar parámetros físicos ligeramente diferentes.



Éstos gobiernan la forma en que cada universo se desarrolla y si uno determinado proporciona un medio agradable en el que se pueda originar la vida. Que nosotros sepamos, la vida es exigente y por ello sólo escogerá unos pocos universos. Pero como hay tantos universos burbuja, ésta es una posibilidad y por tanto nuestra existencia no es tan improbable.

Como los físicos imaginan universos donde estas cantidades son diferentes, algunos han sugerido que esos universos se pueden crear con tanta facilidad como uno como el nuestro. Pueden existir como universos paralelos o multiversos, de tal

forma que nosotros sólo existimos en una realización.

La idea de los universos paralelos encaja con el principio antrópico al permitir que otros universos existan también donde nosotros no podemos. Éstos pueden existir en múltiples dimensiones y están escindidos siguiendo las mismas líneas que la teoría cuántica requiere para que las observaciones provoquen resultados.

Por otra parte

El principio antrópico tiene algunas críticas. Algunos piensan que es una perogrullada —es así porque es así— y que no nos aporta nada nuevo. Otros están insatisfechos por disponer sólo de este universo especial para su estudio, y prefieren buscar en las matemáticas las maneras de afinar automáticamente nuestro universo y que éste discrepe de las ecuaciones simplemente a causa de la física. La idea del multiverso se acerca a esto al posibilitar un número infinito de alternativas. Sin embargo, otros teóricos, incluidos los de la teoría de cuerdas y la teoría M, tratan de ir más allá del big bang para afinar bien los parámetros. Consideran el mar cuántico que precedió al big bang una especie de panorama energético y se preguntan dónde es más probable que acabe el universo si dejamos que se enrolle y se despliegue. Por ejemplo, si hacemos rodar una pelota colina abajo, es más probable que acabe en unos sitios que en otros, como en el fondo de los valles. Así que al tratar de minimizar su energía, el universo podría buscar ciertas combinaciones de parámetros de forma bastante natural, al margen de si somos un producto suyo miles de millones de años después.

«Para hacer un pastel de manzana desde cero, primero tiene que crear el universo.» Carl Sagan, 1980

Los partidarios del principio antrópico y otros, que persiguen medios más matemáticos de acabar con el universo que conocemos, discrepan de cómo hemos llegado a estar donde estamos e incluso de si ésta es una pregunta interesante que formularse. Una vez que vamos más allá del big bang y del universo observable, y nos adentramos en los reinos de los universos paralelos y los campos de energía preexistentes, nos encontramos realmente en terreno filosófico. Pero fuera lo que fuera lo que desencadenara la aparición del universo con su actual apariencia, tenemos suerte de que haya acabado siendo así después de miles de millones de

años. Es comprensible que se tarde un tiempo en cocinar la química necesaria para la vida. Pero la razón por la que deberíamos vivir aquí en un momento determinado de la historia del universo, cuando la energía oscura es relativamente benigna y compensa la gravedad, es algo más que suerte.

Cronología

1904 d. C.	Alfred Wallace discute el lugar del hombre en el universo.
1957 d. C.	Robert Dicke escribe que el universo está limitado por factores biológicos.
1973 d. C.	Brandon Carter discute el principio antrópico.

La idea en síntesis: el universo exacto

Glosario

Aceleración	Es el cambio de la velocidad de un objeto en un tiempo determinado.
Aleatoriedad	Un resultado aleatorio sólo se determina a través de la suerte. No se favorece ningún resultado en especial.
Átomo	Es la unidad más pequeña de materia que puede existir de forma independiente. Contiene un núcleo central duro formado por protones (cargados positivamente) y neutrones (sin carga), rodeado por nubes de electrones (cargados negativamente).
Bosón	Partícula con una función de onda simétrica; dos bosones pueden ocupar el mismo estado cuántico (*véase también* Fermión).
Campos	Maneras de transmitir una fuerza a distancia. La electricidad y el magnetismo son campos, como también la gravedad.
Cuantos	Subunidades más pequeñas de energía, según la teoría cuántica.
Desplazamiento hacia el rojo	El desplazamiento en la longitud de onda de la luz de un objeto que se aleja, debido al efecto Doppler o a la expansión cosmológica. En astronomía, es un método para medir las distancias a las galaxias y estrellas distantes.
Difracción	Consiste en la propagación de ondas al atravesar un margen brusco, como las ondas marinas cuando entran en el puerto a través de una rendija en el muro.
Dualidad onda-partícula	Comportamiento, en especial de la luz, que a veces es similar al de una onda y otras veces al de una partícula.
Edad del universo	*Véase* Universo.
Elasticidad	Los materiales elásticos obedecen a la ley de Hooke. Se estiran proporcionalmente a la fuerza aplicada.
Electricidad	Flujo de la carga eléctrica. Tiene un voltaje determinado (energía), produce una corriente (flujo) y se puede disminuir o bloquear por medio de una resistencia.
Energía	Propiedad de algunas cosas que determina su potencial para cambiar. Se conserva globalmente, pero puede intercambiarse entre diferentes tipos.
Entrelazamiento	En la teoría cuántica, la idea de que las partículas que guardan relación con un punto en el tiempo transmiten información y por tanto pueden utilizarse como mensajeras instantáneas.
Entropía	Medida del desorden. Cuanto más ordenado es algo, menor es su entropía.
Espectro	Secuencia de ondas electromagnéticas desde las ondas de radio,

	pasando por la luz visible, hasta los rayos X y los rayos gamma.
Extensión	Magnitud de la extensión que experimenta un objeto al ser estirado, expresada por unidad de longitud.
Fase	Desplazamiento relativo entre dos ondas, medido en fracciones de longitud de onda. El recorrido de una longitud de onda completa equivale a 360 grados; si el recorrido relativo es de 180 grados, las dos ondas están fuera de fase (*véase también* Interferencia).
Fermión	Es una partícula que sigue le principio de exclusión de Pauli, según el cual dos fermiones no pueden compartir un mismo estado cuántico (*véase también* Bosón).
Fotón	Luz que se manifiesta en forma de partícula.
Frecuencia	El ritmo al cual las crestas de una onda pasan por un punto determinado.
Frente de onda	Es la línea que traza el pico de una onda.
Fuerza	Un estiramiento, empuje o impulso que provoca un cambio en el movimiento de un objeto. La segunda ley de Newton define la fuerza como proporcional a la aceleración que produce.
Función de onda	En la teoría cuántica es una función matemática que describe todas las características de una partícula o cuerpo, incluyendo la probabilidad de que tenga ciertas propiedades o se encuentre en un lugar determinado.
Galaxia	Grupo o nube de millones de estrellas que se mantienen unidas por la gravedad. Nuestra Vía Láctea es una galaxia espiral.
Gas	Nube de átomos o moléculas que no están unidos entre sí. Los gases carecen de límites, pero pueden ser confinados en un recipiente.
Gravedad	Fuerza fundamental por la cual las masas se atraen entre sí. La gravedad está descrita en la teoría de la relatividad general de Einstein.
Hipótesis de los universos paralelos	En la teoría cuántica y en cosmología, la idea de que existen muchos universos paralelos que se escinden a medida que se desarrollan los acontecimientos, y que en un momento determinado nos encontramos en uno de ellos.
Inercia	*Véase* Masa.
Interferencia	Combinación de ondas de diferentes fases que producen un refuerzo (si están en fase) o anulación (si no están en fase).
Isótopos	Elemento químico que existe en diferentes formas, cada una de las cuales tiene en el núcleo el mismo número de protones, pero diferente número de neutrones, por lo que sus pesos atómicos son

	diferentes.
Longitud de onda	Es la distancia entre las crestas de dos ondas sucesivas.
Masa	Propiedad equivalente al número de átomos o cantidad de energía que contiene una cosa. La inercia es una idea similar que describe la masa en términos de su resistencia al movimiento, de tal forma que un objeto pesado (con mayor masa) es más difícil de mover.
Métrica espacio-tiempo	Espacio geométrico combinado con el tiempo mediante una función matemática en la relatividad general. Con frecuencia se visualiza como una hoja de goma.
Momento	Producto de la masa por la velocidad que expresa la dificultad para detener un cuerpo en movimiento.
Núcleo	Es la parte central y dura de un átomo formada por protones y neutrones que se mantienen unidos mediante la fuerza nuclear fuerte.
Observador	En la teoría cuántica, un observador es alguien que realiza un experimento y mide el resultado.
Presión	Se define como la fuerza por unidad de área. La presión de un gas es la fuerza ejercida por sus átomos o moléculas sobre la superficie interna del recipiente que lo contiene.
Quark	Partícula fundamental, que se combina de tres en tres para formar protones y neutrones. Las formas de materia compuestas por quarks se denominan hadrones.
Qubits	Bits de cuantos. Similares a los bits informáticos, pero con información cuántica.
Radiación de microondas del fondo cósmico	Débil resplandor de microondas que llena el cielo. Es la luminiscencia del big bang que se ha enfriado desde entonces desplazándose hacia el rojo a una temperatura de 3 kelvin.
Radiación de un cuerpo negro	Resplandor emitido por un objeto negro a una temperatura específica, que tiene un espectro característico.
Reflexión	El inverso de una onda cuando choca contra una superficie, como el rayo de luz que rebota en un espejo.
Refracción	La curvatura de las ondas generalmente debida a la disminución de su velocidad al atravesar un medio, por ejemplo, la luz cuando pasa a través de un prisma.
Supernova	Explosión de una estrella con una masa por encima de un valor determinado cuando llega al final de su vida.
Tensión	Fuerza por unidad de área que experimenta internamente un sólido debido a la aplicación de una carga sobre él.
Turbulencia	Cuando un fluido en circulación alcanza una velocidad

excesivamente elevada pasa a ser inestable y presenta turbulencias, deshaciéndose después en remolinos y torbellinos.

Universo Todo el espacio y el tiempo. Por definición no incluye todo, pero algunos físicos hablan de universos paralelos separados del nuestro. La edad de nuestro universo es de 14.000 millones de años, determinados a partir de su ritmo de expansión y de la edad de las estrellas.

Vacío Un vacío es un espacio que no contiene átomos. No existe ninguno en la naturaleza —incluso en el espacio sideral existe un pequeño número de átomos por centímetro cúbico—, pero los físicos pueden aproximarse a él en el laboratorio.

Velocidad Es la rapidez en una dirección concreta. Es la distancia en la dirección en que algo se mueve en un tiempo determinado.